

令和3年度
富山湾リモートセンシング
調査事業報告書

令和4年3月

公益財団法人環日本海環境協力センター

目次

1. はじめに.....	1
1-1 諸言.....	1
1-2 藻場について.....	1
1-3 富山県沿岸におけるこれまでの藻場分布調査.....	4
1-4 衛星リモートセンシングによる藻場マッピング.....	5
1-5 NPEC による富山県沿岸の藻場調査.....	6
2. 水中ビデオカメラによる藻場調査.....	10
2-1 目的.....	10
2-2 方法.....	10
2-3 結果と考察.....	12
3. 衛星画像を用いた藻場分布解析.....	25
3-1 目的.....	25
3-2 解析方法.....	25
3-3 結果と考察.....	28
4. ドローンを用いた藻場の空撮.....	31
4-1 目的.....	31
4-2 方法.....	31
4-3 結果.....	38
4-4 考察.....	51
5. 波浪ブイを用いた富山湾西部藻場周辺の波浪観測.....	55
5-1 目的.....	55
5-2 方法.....	55
5-3 結果と考察.....	57
6. 富山湾の海藻・海草に関する文献.....	61
6-1 論文－藻場－.....	61
6-2 論文－海藻培養－.....	62
6-3 報告書.....	62
6-4 本.....	63
6-5 本報告書内で参考にした文献.....	63

1. はじめに

1-1 諸言

藻場は、沿岸における水質環境を保全する上で重要な働きを果たしているとともに、魚介類の生息場や産卵場となって生物多様性を支えている貴重な場所である（新井 2002；水産庁 http://www.jfa.maff.go.jp/j/kikaku/tamenteki/kaisetu/moba/moba_genjou/）。しかしながら、その消失や衰退が全国各地から報告されており、沿岸生態系全体の生物多様性にも大きな影響を及ぼす可能性がある。

富山県沿岸にも豊かな藻場の存在が知られているが、いくつかの場所では、全国と同様にその衰退が報告されている（Fujita *et al.*, 2006；富山水試, 2007）。今後、市民参加の活動などにより、その保全を図っていくためには、その役割や重要性について一般の方々に理解を深めてもらうとともに、藻場の分布域やその変化を適切に把握することが大切である。

公益財団法人環日本海環境協力センター（以下、NPEC）では、平成 24～26 年度の 3 カ年にわたり、富山湾の代表的な藻場において、人工衛星画像解析による分布域推定を行うとともに、海藻の繁茂状況や底生生物の生息状況を現場での潜水調査などにより把握し、藻場の重要性を明らかとした。平成 27 年度には、豊かな沿岸域創造検討会のとりまとめ結果をもとに、一般の人々に藻場の重要性を理解してもらうための小冊子を作成した。また、4 カ年の調査では精度の高い解析ができなかった砂泥域に繁茂する海草アマモ類の分布域（アマモ場）を明らかにするために、現場での水中カメラによる観測調査を実施するとともに、人工衛星画像を用いた画像解析を行った。平成 29 年度は、平成 27、28 年度に得られた知見をもとに、調査時期と現場での調査地点を増やし、アマモ場の季節的消長についても詳細な観察を行った。また、水中補正（Bottom Reflectance Index : Sagawa *et al* 2010）を行うことでアマモ場分布域の推定精度が向上することを確認した。

令和 3 年度は、引き続きドローンによる空撮画像を用いた藻場マッピングの可能性について、さらに検証を進めるとともに、現場観測日に近い日に撮影された衛星画像を新たに入手し、特殊モニタリング・沿岸環境評価地域活動センター（CEARAC）が令和元年に開発した藻場マッピングツール「Seagrass Mapper」を用いて藻場の抽出を試みた。

1-2 藻場について

日本の浅海域の主に潮下帯では、陸上の森林や草原と同じように大型の海藻や海草が群生して広がる植物群落があり、これらを「藻場」と呼んでいる（小松ほか 2009）。海藻は海に生育する大型の藻類で、紅藻、褐藻、緑藻の 3 グループあり、主に岩礁・転石域に分布する。海草は陸上で進化した種子植物のうち海に生活の場を戻した植物群で、岩などに付着する種もあるが、主に砂泥域に分布する。藻場は、優占する海藻により、コンブ場、アラメ場、カジメ場、ガラモ場（写真 1-1：ホンダワラ類の藻場）、テングサ場、アマモ場（写真 1-2）と呼んでいる（藤田 2010）。



写真 1-1 ガラモ場

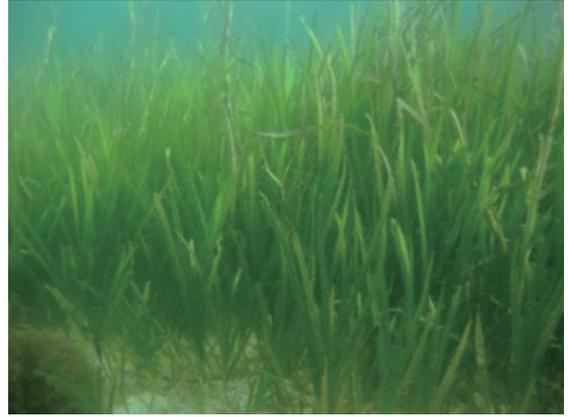


写真 1-2 アマモ場

富山県沿岸域に生育する海藻は、約 300 種で、その内、紅藻が約 180 種、褐藻が約 80 種、緑藻が約 40 種と報告されている（藤田 2001）。また、海草においては、アマモ、コアマモ、スゲアマモ、ウミヒルモの 4 種が生育している。本報告書では、岩礁や転石などに付着して生育する海藻で構成される藻場を「岩礁性藻場」（写真 1-3）、上記 4 種の海草で構成される砂泥性藻場を「アマモ場」（写真 1-4）として記載する。なお、本県の藻場の分布について、図 1-1 に示した。

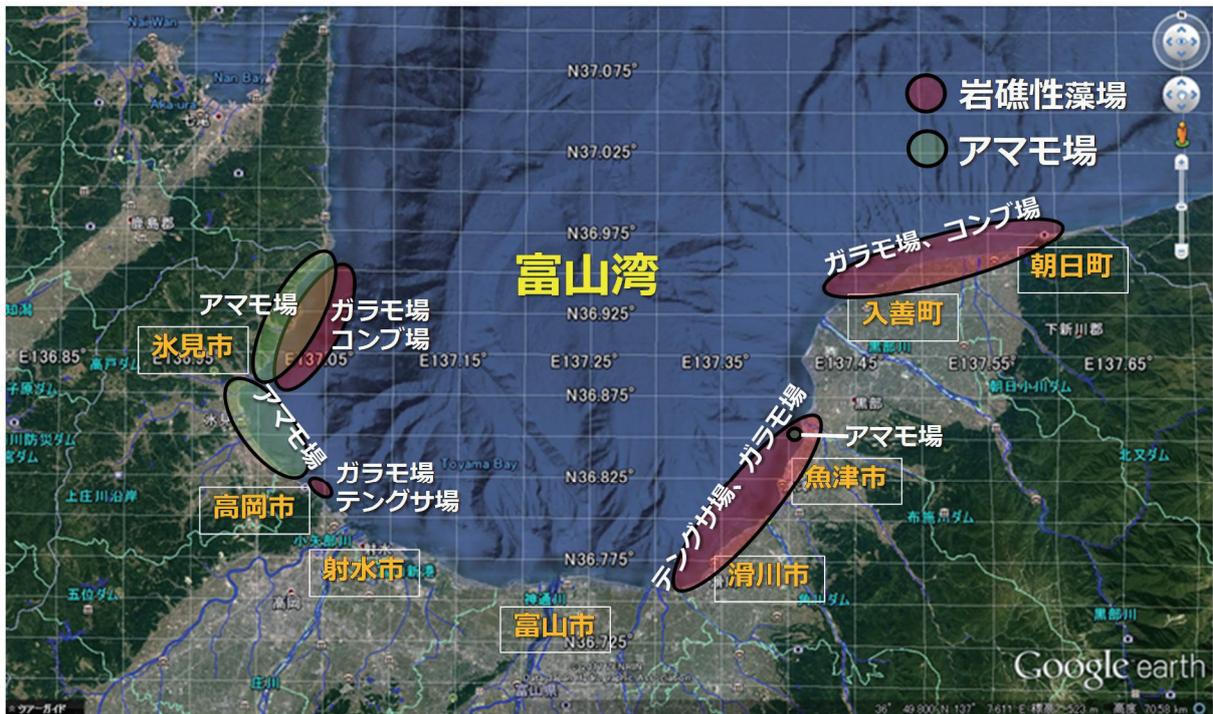


図 1-1 富山県における藻場の分布

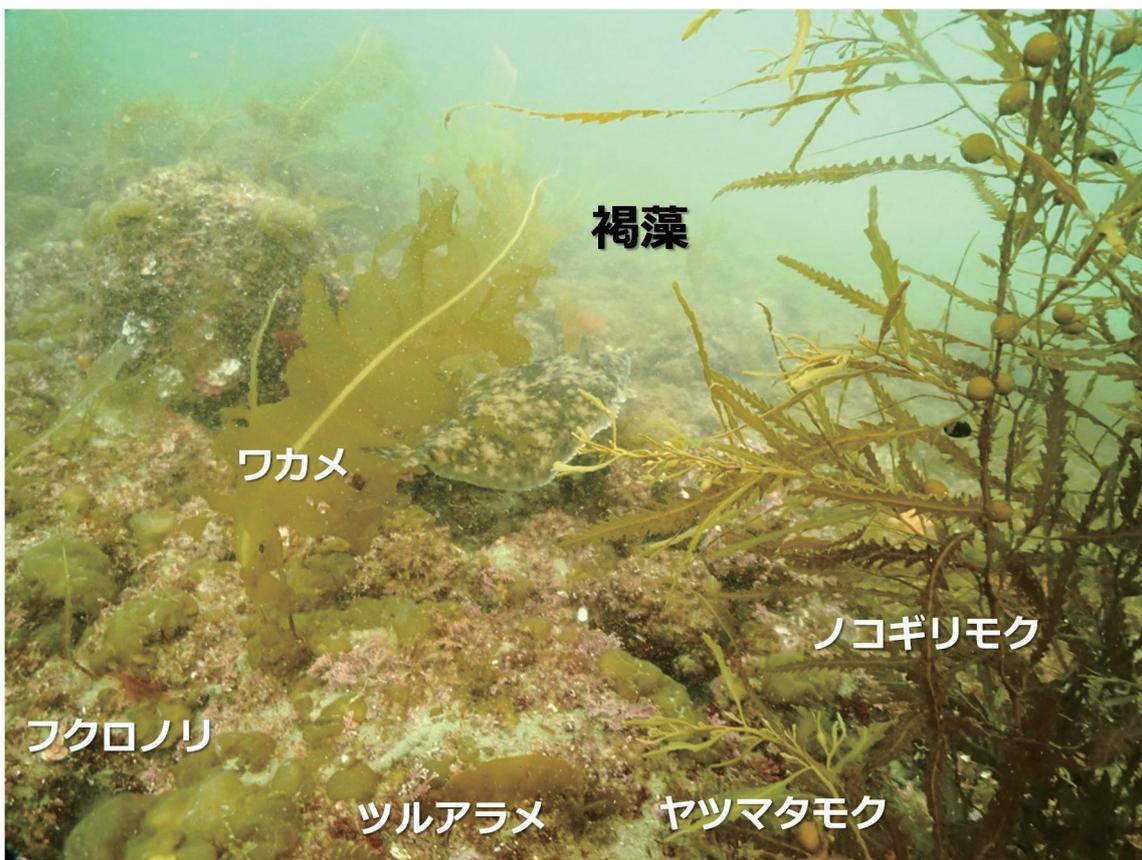
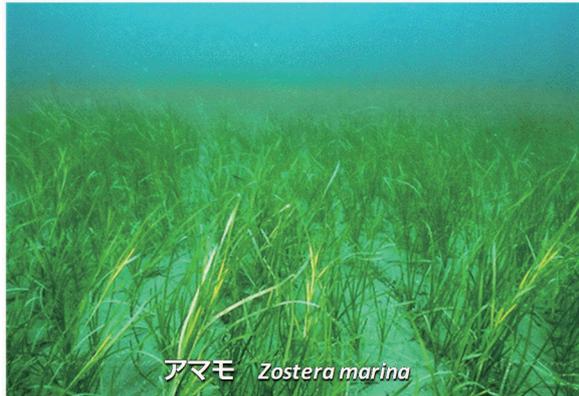


写真 1-3 本県に生育する岩礁性藻場の海藻



アマモ *Zostera marina*



コアマモ *Zostera japonica*



スゲアマモ *Zostera caespitosa*



ウミヒルモ *Halophila sp.*

写真 1-4 本県に生育するアマモ場の海草4種

1-3 富山県沿岸におけるこれまでの藻場分布調査

これまで富山県沿岸において実施された広域にわたる藻場分布調査には、表 1-1 に挙げたものがある。これらの知見から、富山県沿岸の藻場面積は、937 ha (1978 年) →781 ha (1993 年) →1,101 ha (2001 年) →1,067.8ha (2011 年) と推移しており (図 1-2)、富山湾の藻場面積はやや増加傾向にあるように見える。しかし、調査方法が聞き取り、潜水目視および航空機観測などと異なってきており、調査手法の発展によって把握される藻場の範囲が広がり、藻場面積が多くなった可能性があることを考慮しなければならない。

アマモ場に関しては、富山県水産試験場 (2002) および富山県水産研究所 (2013) では、それぞれ 2001~2002 年と 2011~2012 年に実施された航空機からの空中写真撮影と潜水調査結果から、アマモ場の分布域が推定され、その面積はそれぞれ約 420ha および 323ha と見積もられている。ただし、このアマモ場の減少については、画像から藻場の場所を判読する際の困難性により生じた可能性が指摘されており、現場での観察も含め、アマモ場の分布域を確認する必要があることが指摘されている (富山県水産研究所 2013)。一方、富山県沿岸におけるアマモ場の分布域は、2 回の調査を通じて、県西部の氷見市沿岸に県全体の 90%以上が存在すると推定された。

藤田 (2001) は、航空機からの空中写真と現場での潜水調査により、氷見市から高岡市にかけての沿岸域において、アマモを含めた海藻の深度別の分布状況を紹介している。富山県水産試験場 (2007) では、2006 年春から氷見市中波地先におけるアマモ類の分布量の季節変化を水深別に調査し、水深 5、7m には主にアマモが、水深 9、11m においてはスゲアマモが通年生育し、スゲアマモの現存量は季節的に大きく変動することが明らかにされた。これら以外には、魚津市地先に

コアマモ（藤田・高山 1999）ならびにアマモ（浦邊・松村 2006）が生育することが報告されている。また、富山湾周辺では、能登半島の七尾湾西湾や珠洲市沿岸にもアマモ場の存在が報告されている（池森ら 2012、東出ら 2014）。

なお、2018年度の本事業調査により、氷見漁港周辺のアマモ場において、1年生のアマモの存在が示唆された。

表 1-1 富山湾における藻場分布調査

環境省	富山県（1978）第2回自然環境保全基礎調査 干潟・藻場・サンゴ礁分布調査報告書 環境省委託
	環境庁自然保護局・財団法人海中公園センター（1994）第4回自然環境保全基礎調査
	環境庁自然保護局（1998）第5回自然環境保全基礎調査
富山県水産研究所	富山県水産試験場（2002）平成13年度富山湾漁場環境総合調査
	富山県水産試験場（2007）平成18年度富山湾漁場環境総合調査
	富山県水産研究所（2013）平成23年度富山湾漁場環境総合調査
	富山県水産研究所（2018）平成28年度富山湾漁場環境総合調査
その他	海と渚環境美化推進機構（2003）平成14年度藻場・干潟環境保全調査報告書
NPEC	（公財）環日本海環境協力センター（2013～2021）平成24～30年度、令和元、2年度富山湾リモートセンシング調査事業報告書

（単位：ha）

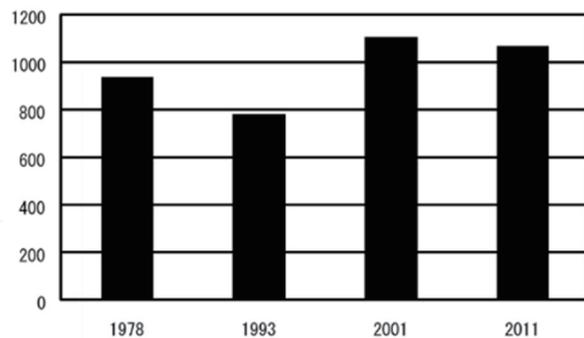


図 1-2 富山県沿岸における藻場面積の推移

（富山県 1978、環境庁 1994、1998、

富山県水産試験場 2002、富山県水産研究所 2013）

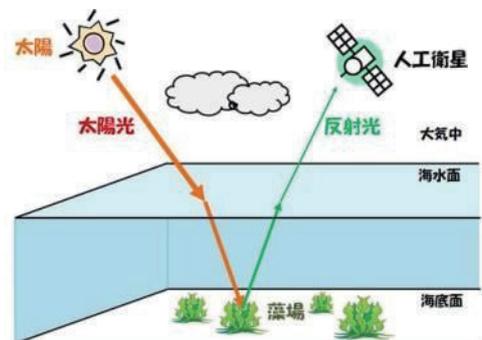


図 1-3 衛星による藻場分布解析の概念図

1-4 衛星リモートセンシングによる藻場マッピング

藻場保全を推進して行くためには、その分布域の変化を継続的にモニタリングする必要がある。藻場の分布域を把握するためには、船上からの目視観察や潜水調査等の直接的な方法をはじめ様々な手法が存在するが、いずれも長所と短所が存在する。人工衛星リモートセンシングによる藻場マッピングは、海表面から射出する光のスペクトル情報を分類し、間接的に藻場分布を知る手段として知られており、空間的に広範囲のデータ取得が可能であることや、既に取得された画像データ（アーカイブデータ）の利用が可能であること、さらには画像に水柱補正を実施することにより、深い水深帯における藻場分布をより正確に推定できるといった優れた特徴がある。図 1-3 に、藻場解析に関する衛星の概念図を示す。

1-5 NPECによる富山県沿岸の藻場調査

2012年度から2014年度に実施した調査により、下記のとおりの結果が得られた。

氷見市、魚津市、入善町ならびに朝日町地先の藻場において潜水調査を秋季に実施し、富山湾の代表的な藻場に繁茂する海藻や、藻場に生息する生物の種類や分布量を明らかにした。湿重量で比較すると、氷見市ではホンダワラ類（褐藻類）が大部分を占め、魚津市では紅藻類であるマクサが最も多く、入善町ではホンダワラ類やツルアラメ（褐藻類）、朝日町地先ではホンダワラ類が優占した。魚津、入善町、朝日町地先では、オオヘビガイなどの軟体動物が湿重量で最も多かった。個体数では、入善町地先では重量と同様に軟体動物が最も多かったが、魚津市地先では軟体動物と環形動物が、朝日町地先では節足動物が最も多かった。

富山県西部に位置する氷見市周辺の人工衛星画像（2010年2月22日撮影）の解析により、ガラモ場およびその他藻場の面積が189haと推定された。射水市から富山市の画像（2010年2月22日撮影）の解析により、県中央部の砂浜域に設置された離岸堤や浅堤に付随する藻場を明らかとし、入善町から朝日町の人工衛星画像（2009年11月7日撮影）からは、県東部を代表する岩礁性藻場の分布域を高い分類精度で推定した（図1-4）。

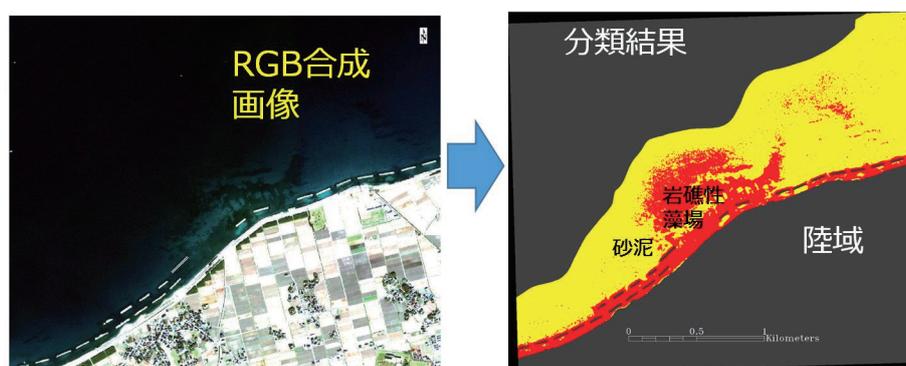


図1-4 入善町吉原地先における藻場分布の推定結果 ■ 岩礁性藻場 ■ 砂泥(植生なし)

2015年度には、富山湾西部沿岸域（氷見市地先）のアマモ場の分布状況・季節的消長に関する調査を6月と11月に行ったところ、最もアマモ類が繁茂する氷見漁港北西海域の水深が深くなる沖側で、6月には生育が確認されたものの、11月にはほとんど確認されなかったため、本地先に生育するアマモの繁茂状況は季節によって異なることが示唆された。また、氷見沿岸域における高解像度（2m）の人工衛星画像【GeoEye-1：2014年11月22日撮（a、b、c）】を用いて、大気補正済みの青、緑、赤、近赤外の4バンドによる解析を行ったところ、図1-5の分類結果（a'、b'、c'）が得られ、比較的高い解析精度が得られたサブエリア（a）におけるアマモ場面積は207haと推定された。しかしながら、この結果については、既往の藻場の分布状況と一致しないエリアがあるなど（特にbとcの赤色のエリア）、精度上の問題が残された。

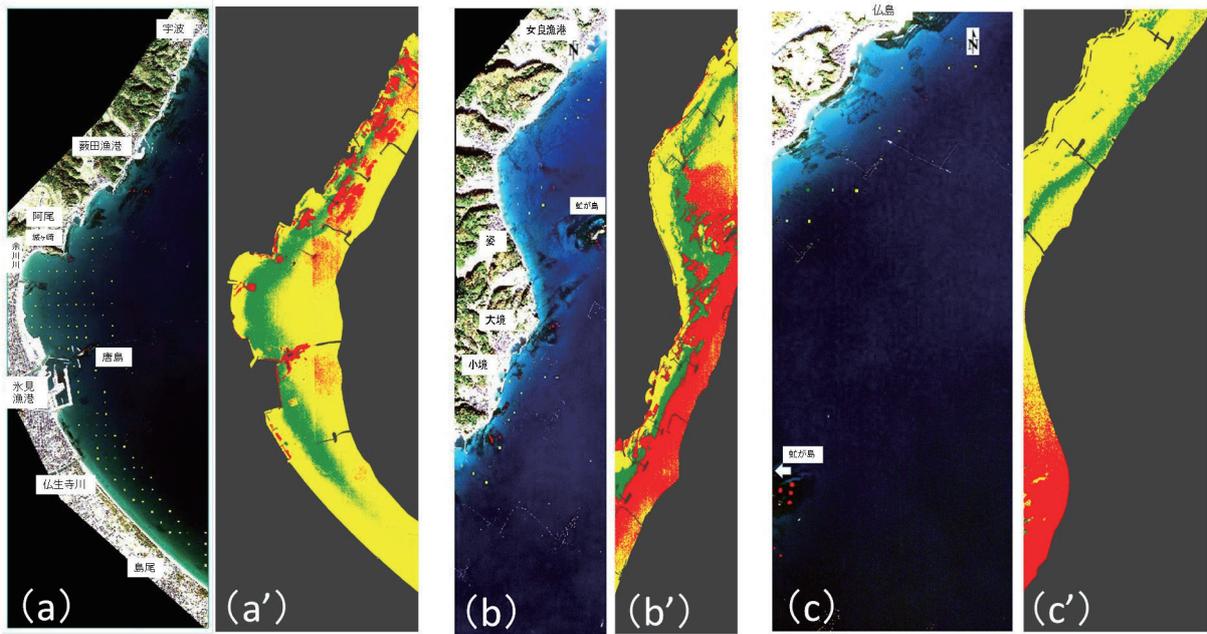


図 1-5 氷見市地先における藻場分布の推定結果

■ アマモ場 ■ ガラモ場、その他の藻場 ■ 砂泥(植生なし) ■ 陸域および水深 20m 以深

2016 年度は、富山県西部沿岸における高解像度 (2~5m) の人工衛星画像を、画像アーカイブが掲載されたウェブサイトから検索し、2016 年 3 月 17 日に撮影された RapidEYE の画像 (5m 解像度) を入手し、解析を行った。この画像は、青 (440-510nm)、緑 (520-590nm)、赤 (630-680nm)、レッドエッジ (690-730nm)、近赤外 (760-850nm) の 5 つのバンド (波長帯) により構成されている。人工衛星画像の解析は、画像解析ソフト (ENVI 5.2) を用い、Mumby and Edwards (2000) ならびに澤山・小松 (2011) を参考に藻場分布を推定した。本解析では、複数のサブエリアに分けずに解析を行った。また、2015 年度の解析結果から、アマモ場の判定には水柱補正を行わない場合に分類精度が高くなったことから、水柱補正は行わずに解析を行った。

大気補正済みの RapidEYE 画像を RGB 合成し【図 1-6 (a)】、陸域と水深 20m 以深をマスクした後に、初夏の繁茂期に調査したシートゥルースデータを用いて、関心領域の作成を行った【図 1-6 (b)】。5 バンドの画像を用いて、最尤法による教師付き分類を行った結果【図 1-6 (c)】、アマモ場、岩礁性藻場及び砂泥域で、それぞれ過大・過小に分類された海域もあるが、アマモ場に関しては、現場調査の結果と概ね一致していた。アマモ場に分類されたピクセル数から富山県西部海域における繁茂期のアマモ場の面積は、約 716ha と推定された。ただし、分類精度の指標である全体精度は 0.48、タウ係数は 0.36 となり、それほど高い値ではなかった。アマモ場のユーザー精度は 0.65 となったが、岩礁性藻場の精度は 0.10、砂泥域の精度は 0.49 となり、アマモ場の精度よりも低かった。特に、岩礁性藻場の精度が極端に低いことが、全体の分類精度とタウ係数を低くした要因の一つと考えられた。2016 年春の繁茂期における分析では、水柱放射量補正 (BRI) を行わなかったため、特に、岩礁性藻場の分類精度が低かった。今後は、更に、シートゥルースデータを追加し、水柱放射量補正 (BRI) による再解析が必要であると考えられた。

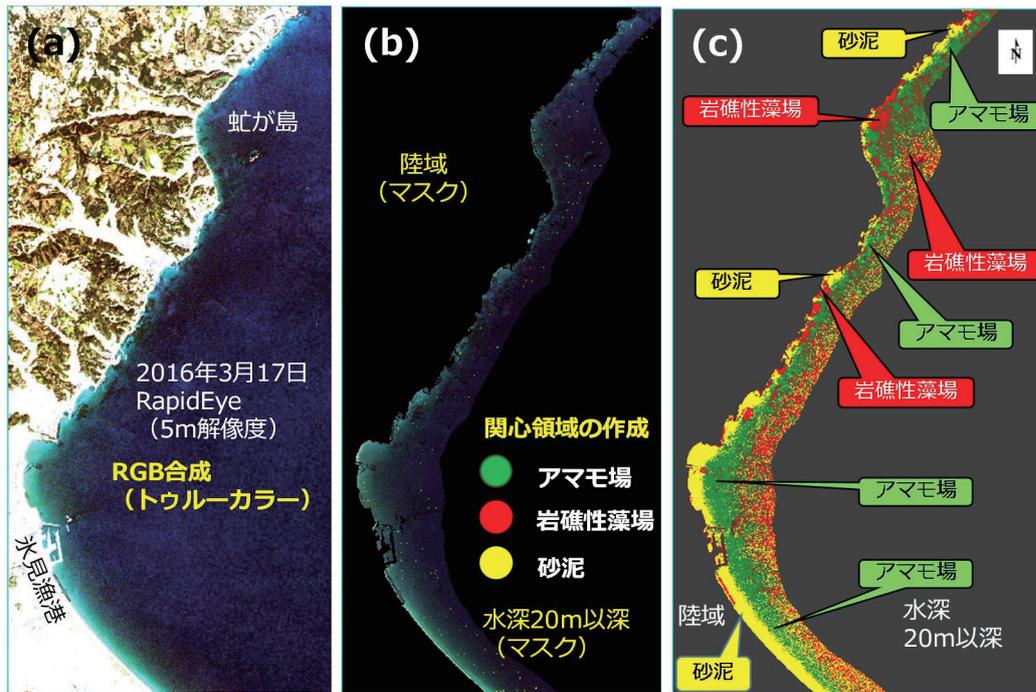


図 1-6 氷見市沿岸域における藻場の分布の推定

2017 年度は、2016 年度よりも精度の高い藻場分布域を推定するため、RESTEC が開発した CMOBAH3.0 と画像解析ソフト (ENVI 5.2) を用いて、陸域にマスクをかけるとともに大気補正と水柱補正を各バンド (4Bands : Blue Band、Green Band、Red Band、Red edge Band) の画像すべてに行いアマモ場分布域を推定した。その結果、アマモ場と分類されたピクセル数から富山県西部海域における繁茂期のアマモ場の面積は、約 592ha と推定された。過大評価であると考えられた 2016 年度のアマモ場の推定面積は、約 716ha (精度 : 65%) であったが、2017 年度のアマモ場の精度は 72% と昨年度よりも高くなり、より正確な面積を推定することができた (図 1-7)。

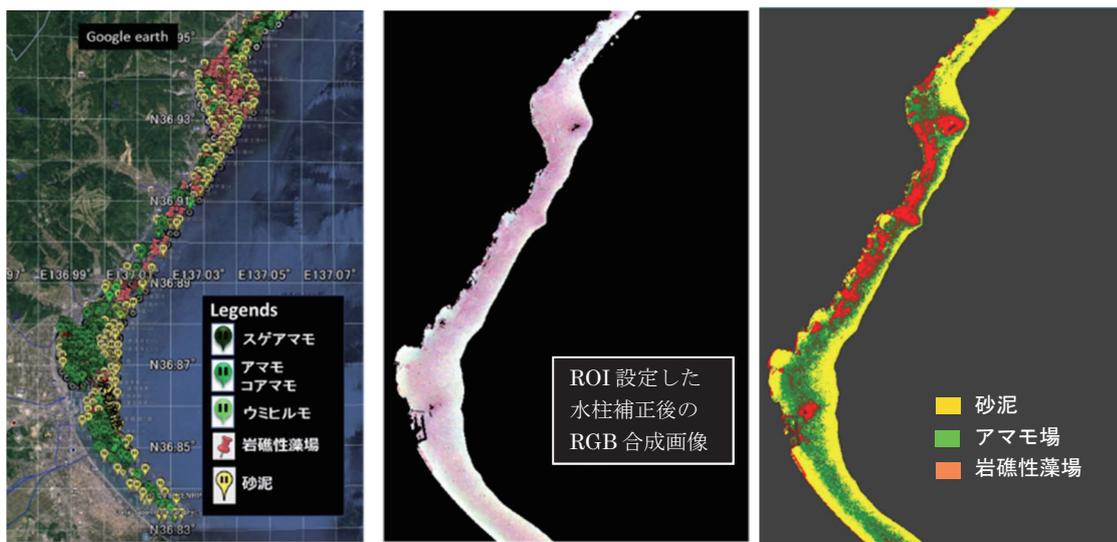


図 1-7 氷見市沿岸域における藻場の分布の推定

(左:教師データ、中央:水柱補正後の RGB 合成画像、右:藻場分布推定結果)

2018年度は、2018年7月11～12日に実施した水中ビデオカメラによる現場観測にタイミングが近く、空間解像度が2mと高い2018年7月15日に撮影されたWorld View-2のマルチスペクトル画像を用い、BRI水柱補正を施した上で、アマモ場分布域の推定を試みた。その結果、アマモ場分布域推定結果は、一部の海域（氷見漁港内及び浅海域）を除き、現場調査結果とよく一致した。2019年度には、2019年5月19日に撮影されたWorld View-3のマルチスペクトル画像、2020年度には2020年9月23日に撮影されたプレアデス衛星マルチスペクトル画像を用いて、高岡市（国分海浜公園周辺）沿岸域の藻場分布域の推定を試みたところ、両画像ともDepth Invariant Index (DII) (Lygenga, 1981)法による水柱補正よりも、BRI水柱補正を施した後で、藻場分布を推定した時のほうがより高い精度検証の結果が得られた(図1-8)。

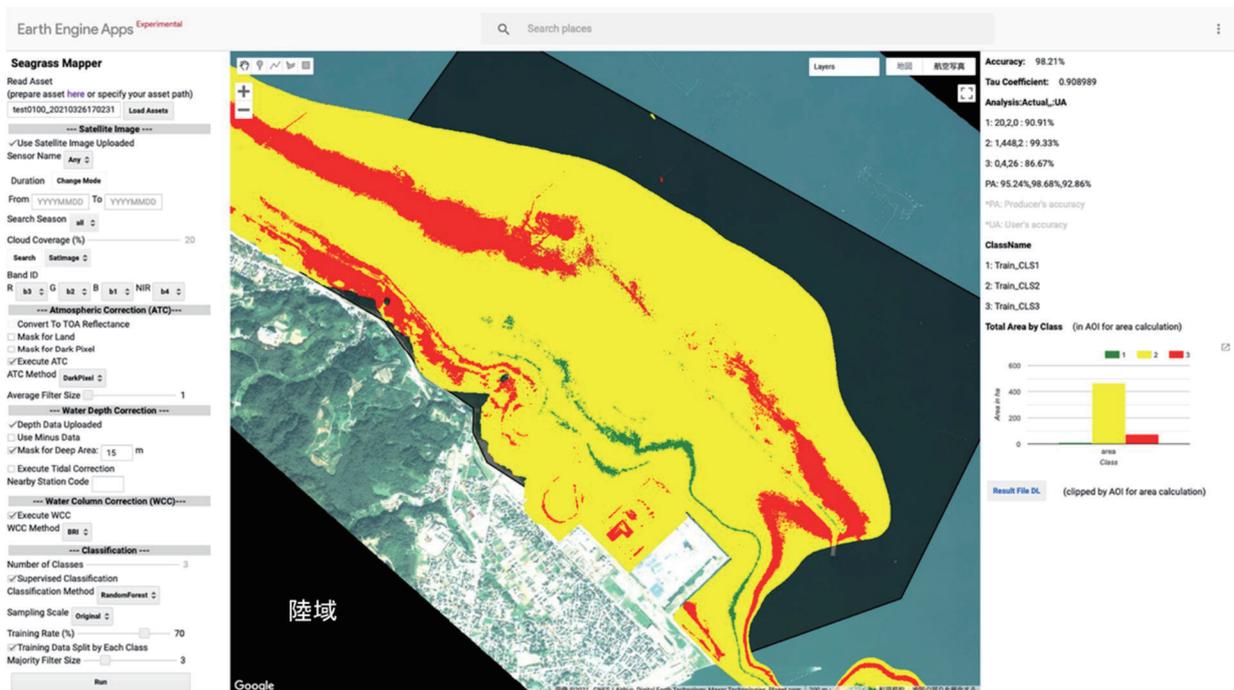


図1-8 2020年9月23日のプレアデス衛星マルチスペクトル画像を暗画素法による大気補正、BRI法による水柱補正後、ランダムフォレスト法により分類した国分海浜公園周辺における底質分類結果（緑色がアマモ場、赤色が岩礁性藻場、黄色が砂地を示す。）

2. 水中ビデオカメラによる藻場調査

2-1 目的

人工衛星画像の解析において最尤法による画像分類を行うには、解析対象とする区域内で、予め海底の底質データ（シートゥルスデータ）を取得し、分類教師データとして設定する必要がある。また、分類がどれだけ正しく実行されたかの精度検証を行うためにも、これらのシートゥルスデータは必要である。そこで、垂下式の水中ビデオカメラ調査を実施し、広範囲にわたるシートゥルスデータを効率的に取得することを目的とした。

2-2 方法

(1) 水中ビデオカメラによる調査

富山県沿岸のアマモ場の 90%以上が氷見市沿岸に存在するとされているが、その隣接海域の調査事例は極めて少ない。そこで、調査海域は 2019 年度から継続調査している氷見市沿岸に隣接する高岡市伏木地先とし、図 2-1 の調査海域の底質状況を船上から垂下した水中ビデオカメラにより観察・記録した。一般に藻場は水深 20 m 以浅に形成されることから、調査地点は水深約 20 m 以浅の範囲に限定し、画像解析を実施する区域のほぼ全域を含むように調査地点を設定した。なお、調査地点の緯度経度は、Google Earth 上で、水深 3、5、8、10、12、15、18、20 m を目安に予め設定した。

調査は、初夏のアマモ繁茂期（2021 年 7 月 6 日）に 41 地点、秋のアマモ衰退期（2021 年 11 月 2 日）に 35 地点で、新湊漁業協同組合の協力を得て行った（図 2-1）。また、調査に用いた船舶の操船は、東海水産の東海勝久氏が行った。

水中の観察は、水中ビデオカメラ（みるぞう Pro、有限会社ファーストシーン製）を船上から海底までケーブルを繰り出して垂下し、横向きに据え付けられた 4 つのカメラ（各 90 度ごとに 4 方向）と下向きの 1 つのカメラにより撮影した海底付近の映像を、1 地点あたり数分間程度、船上モニターで観察するとともに録画した（写真 2-1）。調査地点の位置（緯度経度）は、携帯型の GPS データロガー（Wireless GPS Logger i-gotU GT-600、Mobile Action 社製）及び高精度 RTK-GNSS レシーバー（DG-PR01RWS、ビスステーション株式会社製）により記録した。調査地点における水深を把握し、位置情報データと時刻で紐づけて観察場所を特定するために、水深データロガー（DEFI-D5HG、JFE アドバンテック社製）をビデオカメラの直上に取り付け、観察水深の記録を行った。11 月の調査では、水中ビデオカメラのシステムの更新により、録画された海底映像はカメラ 1 台分のみであった。

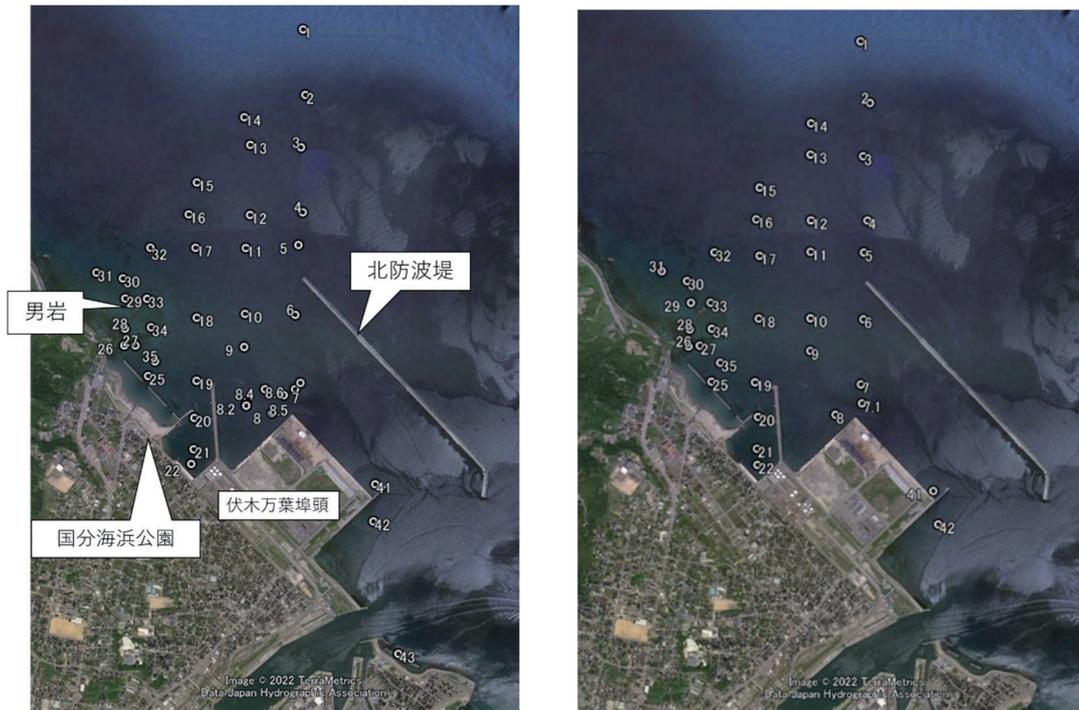


図 2-1 調査海域（高岡市伏木地先）

左：2021年7月6日、右：2021年11月2日

調査時の観察及び録画された映像を参考にして、底質を、アマモ場、岩礁性藻場（岩礁に繁茂するホンダワラ類やコンブ類などの海藻）、および砂泥域に3区分した。加えて、アマモ場が確認できた地点では繁茂状況を以下の通りランク付けした。海底からの数十センチの高さから下向きに撮影したカメラの映像を用い、画面に占めるアマモ類の被度を、被度0：0%（なし）、被度1：1～10%（極点生）、被度2：11～25%（点生）、被度3：26～50%（疎生）、被度4：51～75%（密生）、被度5：76%以上（濃生）の6段階に区分した。なお、被度の判定には、水平方向（横向き）の4つのカメラの映像も参考に判断した。また、アマモ類や他の海藻の種類、アマモの生育状況（栄養株や花枝株の有無など）を同時に観察した（写真2-2～2-10）。



写真 2-1 垂下式水中ビデオカメラ(左)と投下の様子(右上)

2-3 結果と考察

1) 高岡伏木地先 (7月)

①伏木富山港 (高岡市伏木地区) 北防波堤内側

北防波堤と埠頭の間は、底質が砂であり、海藻の繁茂は少なかったが、伏木万葉埠頭 (以下、埠頭) の西側先端付近 (地点 7、8.6) にアマモの繁茂が認められた (図 2-1、表 2-1、写真 2-2、2-3、図 2-2)。

埠頭西側先端周辺に分布するアマモ場の大きさを調べるため、水中ビデオカメラを沈めたまま埠頭西側先端部から北、その後、南東に進み、埠頭正面側まで移動し、連続的に観察した (図 2-2)。地点 8.6 (水深 8 m) ではアマモが確認できたが、北に進むとやがてなくなった。その後、南東方向に進み、水深 8 m で再びアマモが確認されたが、埠頭岸壁と北防波堤の間に至ると水深が 10m 以上となり、アマモがなくなった。水深 10m 以上の場所の海底は堆積物が舞い上がる状態で、底質は泥であった。今回、水中ビデオカメラで連続して観測したことにより、このアマモ場は少なくとも北東—南西方向に 150m 程度、北西—南東方向に 90m 程度の広がりを持ち、面積は 1ha 程度であることがわかった。この場所にアマモ場が存在する理由として、北西方向に張り出した北防波堤によって、北からの波の影響が軽減し、生育に適した海洋物理環境が維持されるためと考えられる。

富山県の伏木港湾計画によると、アマモが確認された場所は 14m まで浚渫を行う泊地の西端に位置しており、浚渫工事により水深が深くなり、底質が変化したことで、北防波堤と埠頭の間はアマモの生育条件に適さなくなっていると考えられた。

このアマモ場は氷見市沿岸に存在するアマモ場の東端に、飛び地として存在しており、氷見市沿岸のアマモ場と比較することで、季節や年によって分布域を変化させるアマモの生態を解明できる可能性があると考えている。

②国分海浜公園、男岩周辺

国分海浜公園、男岩周辺の海域では、底質は砂が主で、岩がところどころ混じる状況であったが、地点 12、26、27、34 では、ガラモの繁茂が確認された。

国分の防波堤内側の定点 21、22 は波が穏やかであると推測され、地点 7、8.6 のようにアマモ場が形成される可能性があると思われたが、実際には海底は砂や泥のみで、アマモはなかった。この場所も伏木港湾計画では泊地であり、浚渫等の影響でアマモ場が形成されないと推測される。なお、調査地点の詳細は、表 2-1 に示した。

2) 高岡伏木地先 (11月)

①伏木富山港 (高岡市伏木地区) 北防波堤内側

北防波堤内側に海草の繁茂はなかった。7月の調査では埠頭西側先端付近にアマモが確認されたが、11月の調査では確認されなかった (表 2-2、写真 2-7)。この場所では 2019 年度、2020 年度も同様に夏に確認できたアマモが秋に消失しているが、アマモ場が消失した原因は不明であり、その解明には、今後継続して詳細な調査を実施する必要がある。

②国分海浜公園、男岩周辺

国分海浜公園、男岩周辺の海域では、底質は砂が主で、岩がところどころ混じる状況で、地点 26、29、31、34 は岩であったが、ガラモは地点 26、34 でのみ確認された（図 2-3）。地点 29、31 の水深は 6m、7m であるのに対し、地点 26、34 は 1.5m、3m と浅い。水深の違いがガラモの定着、成長に影響している可能性が考えられる。なお、調査地点の詳細は、表 2-2 に示した。

表 2-1 水中ビデオカメラ調査点の位置、底質、海草・海藻の繁茂状況(高岡伏木地区)

(2021年7月6日)

定点 (7月)	緯度		経度		水深	底質	海草類	海草類 被度	備考
	度	分	度	分					
1	36	49.48	137	3.81	30	r/st	無	—	ツルモ
2		49.28			20	s/m	無	—	ガラモ
3		49.12			15	s/m	無	—	
4		48.92			8	s	無	—	
5		48.82			13	s	無	—	
6		48.61			9	s	無	—	
7		48.4			5	s	アマモ	4	
8		48.3			3.7	6	s	無	—
8.2		48.33		3.61	6	s	無	—	
8.3		48.33		3.61	5	s	無	—	
8.4		48.38		3.68	6	s	無	—	
8.5		48.36		3.75	7	s	無	—	
8.6		48.38		3.79	8	s	アマモ	4	
9		48.51		3.6	7	s	無	—	
10		48.61			9	s	無	—	
11		48.81			10	s	無	—	
12		48.91			12	s/r	無	—	ガラモ
13		49.13			16	s/m	無	—	
14		49.21		20	s/m	無	—		
15		49.01		3.41	12	s/m	無	—	
16		48.91			11	s	無	—	
17		48.81			9	s	無	—	
18		48.6			7	s	無	—	
19		48.4			6	s	無	—	
20		48.29			4	s	無	—	
21		48.19			6	s/m	無	—	
22		48.15			5	m	無	—	
25		48.41		3.23	6	s	無	—	
26		48.51		3.14	1.5	r/s	無	—	ガラモ
27		48.51		3.18	5	s/r	無	—	ガラモ
28		48.56		3.14	3	s/r	無	—	
29		48.65		3.14	6	s	無	—	
30		48.71		3.13	8	s	無	—	
31		48.73		3.03	7	r/s	無	—	
32		48.81		3.24	8	s	無	—	
33		48.65		3.22	6	s	無	—	
34		48.56		3.24	3	r	無	—	ガラモ
35		48.46		3.26	5	s	無	—	
41		48.09		4.1	9	m	無	—	
42		47.97		4.09	9	s	無	—	
43		47.57		4.19	1.5	s	無	—	アマモの枯れた後のようにも見えた

s: 砂、m: 泥、st: 石、r: 岩

表 2-2 水中ビデオカメラ調査点の位置、底質、海草・海藻の繁茂状況(高岡伏木地区)

(2021年11月2日)

定点 (11月)	緯度		経度		水深 (m)	底質	海草類	海草類 被度	備考
	度	分	度	分					
1	36	49.46	137	3.79	27	s	無	-	
2		49.27			19	s	無	-	
3		49.11			15	s	無	-	
4		48.91			12.5	s	無	-	
5		48.81			11	s	無	-	
6		48.6			9	s	無	-	
7		48.4			8	s	無	-	
8		48.31			3.71	6	s	無	-
9		48.5		7		s	無	-	
10		48.61		8		s	無	-	
11		48.81		10		s	無	-	
12		48.91		12	s	無	-		
13		49.11		3.6	14	s	無	-	
14		49.21		3.6	15.5	s	無	-	
15		49.01		3.41	11.5	s	無	-	
16		48.91			10	s	無	-	
17		48.8			9	s	無	-	
18		48.6			7.5	s	無	-	
19		48.41			6	s	無	-	
20		48.3			4.5	s	無	-	
21		48.2			6	m	無	-	
22		48.15			6	m	無	-	
25		48.41		3.23	6.5	s	無	-	
26		48.51		3.14	1.5	r	無	-	ガラモ
27		48.52		3.18	4	s	無	-	
28		48.57		3.14	4	s	無	-	
29		48.65		3.15	6	r	無	-	
30		48.72		3.13	7	s	無	-	
31		48.75		3.04	7	r	無	-	
32		48.81		3.24	8.5	s	無	-	
33		48.65		3.22	6.5	s	無	-	
34		48.57		3.23	3	r	無	-	ガラモ
35		48.47		3.26	5.5	s	無	-	
41		48.08		4.08	7.5	s/m	無	-	
42		47.97		4.1	9	s	無	-	

s: 砂、m: 泥、st: 石、r: 岩



伏木1 水深30m



伏木2 水深20m



伏木3 水深15m



伏木4 水深8m



伏木5 水深13m



伏木6 水深9m



伏木7 水深5m



伏木8 水深6m



伏木8.2 水深6m



伏木8.3 水深5m

写真 2-2 高岡市伏木地先の各定点(2021年夏季)



伏木8.4 水深6m



伏木8.5 水深7m



伏木8.6 水深8m



伏木9 水深7m



伏木10 水深9m



伏木11 水深10m



伏木12 水深12m



伏木13 水深16m



伏木14 水深20m



伏木15 水深12m

写真 2-3 高岡市伏木地先の各定点(2021年夏季)



伏木16 水深11m



伏木17 水深9m



伏木18 水深7m



伏木19 水深6m



伏木20 水深4m



伏木21 水深6m



伏木22 水深5m



伏木25 水深6m



伏木26 水深1.5m



伏木27 水深5m

写真 2-4 高岡市伏木地先の各定点(2021年夏季)



伏木28 水深3m



伏木29 水深6m



伏木30 水深8m



伏木31 水深7m



伏木32 水深8m



伏木33 水深6m



伏木34 水深3m



伏木35 水深5m



伏木41 水深9m



伏木42 水深9m

写真 2-5 高岡市伏木地先の各定点(2021年夏季)



伏木43 水深1.5m

写真 2-6 高岡市伏木地先の各定点(2021年夏季)

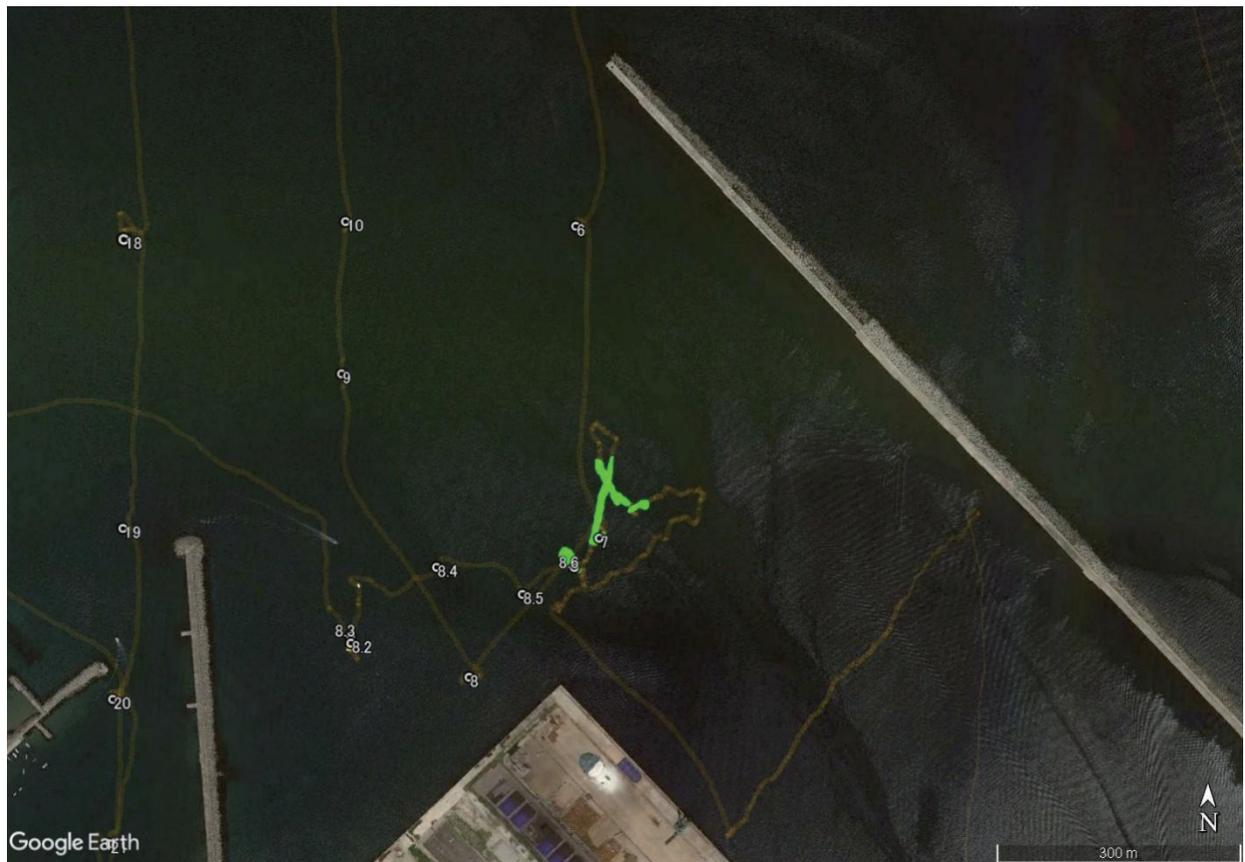
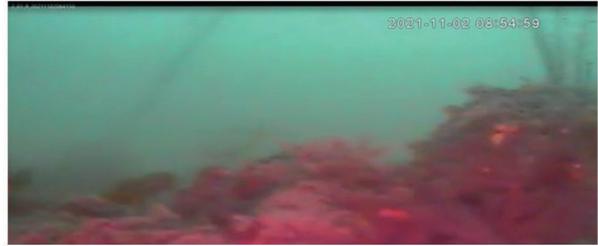


図 2-2 万葉埠頭西側先端部周辺で確認されたアマモ場(緑)と調査船の軌跡(薄黄色) (2021年夏季)



伏木1 水深27m



伏木2 水深19m



伏木3 水深15m



伏木4 水深12.5m



伏木5 水深11m



伏木6 水深9m



伏木7 水深8m



伏木8 水深6m



伏木9 水深7m



伏木10 水深8m

写真 2-7 高岡市伏木地先の各定点(2021 年秋季)



伏木11 水深10m



伏木12 水深12m



伏木13 水深14m



伏木14 水深15.5m



伏木15 水深11.5m



伏木16 水深10m



伏木17 水深9m



伏木18 水深7.5m



伏木19 水深6m



伏木20 水深4.5m

写真 2-8 高岡市伏木地先の各定点 (2021 年秋季)



伏木21 水深6m



伏木22 水深6m



伏木25 水深6.5m



伏木26 水深1.5m



伏木27 水深4m



伏木28 水深4m



伏木29 水深6m



伏木30 水深7m



伏木31 水深7m



伏木32 水深8.5m

写真 2-9 高岡市伏木地先の各定点(2021 年秋季)



伏木33 水深6.5m



伏木34 水深3m



伏木35 水深5.5m



伏木41 水深7.5m



伏木42 水深9m

写真 2-10 高岡市伏木地先の各定点(2021 年秋季)



図 2-3 国分海浜公園周辺の底質が岩の場所(赤)とガラモの有無(2021 年秋季)

3. 衛星画像を用いた藻場分布解析

3-1 目的

富山県沿岸域における藻場分布域については、これまでに2001～2002年と2011～2012年に航空機から撮影された空中写真により、岩礁域に繁茂する海藻の藻場と砂泥域に繁茂するアマモ場を合わせて、およそ1,100haと見積もられている（富山水試 2002、富山水研 2013）。また、本事業により2012～2014年度に実施された人工衛星画像の解析により、富山県沿岸の主要な岩礁性藻場において、その分布域を深い水深帯まで詳細に把握した。砂泥域に形成されるアマモ場については、氷見市から高岡市の沿岸域に存在することが潜水調査結果から報告されており（藤田 2001、富山県水産試験場 2002 および 2007）、分布水深については比較的詳細な記述があるものの、海岸線に沿った水平方向の分布の広がりについてはほとんど明らかとされていない。一方、富山県水産試験場（2002）および富山県水産研究所（2013）による航空機からの空中写真を用いた解析では、アマモ場の範囲が示されたが、水深10m以深において画像の判読に困難な場合があったことが指摘されており（富山県水産研究所 2013）、砂泥性のアマモ場の分布域、特に深い水深帯での分布域については再検討を要すると思われる。2016年度には、富山県西部の計795地点において取得した現場観測データを基に、画像解析ソフトENVI5.2を使用して、Rapid-Eyeの衛星画像（解像度5m）から県西部氷見市のアマモ場繁茂期の分布域を推定したが高い分類精度には至らず、その要因として、深い海域での光の減衰を考慮した水柱補正を行っていないことが一つの要因であると考えられた。2017年度は、より精度の高い藻場分布域を推定するため、人工衛星画像に水柱補正（BRI:Bottom Reflectance Index）を施すことによりアマモ場分布域を推定した結果、アマモ場の精度を72%に高めることができた。2019年度は、高岡市（国分海浜公園周辺）沿岸域において2019年6月21日に実施した水中ビデオカメラによる現場観測結果とWorldView-3の衛星画像使用し、アマモ場分布域の推定を試みた。2020年度は、2019年度と同じ海域を対象に、2020年8月6日に現場観測を実施し、2020年9月23日のプレアデス衛星マルチスペクトル画像を用いて、アマモ場の推定を試みた。今年度は、2021年7月6日に行った水中ビデオカメラによる現場観測結果と、同海域の2021年8月7日のWorldView-2の衛星画像を使用し、アマモ場分布域の推定を試みた。

3-2 解析方法

衛星画像の解析には、特殊モニタリング・沿岸環境評価地域活動センター（CEARAC）が2019年に開発した藻場マッピングツール「Seagrass Mapper」を用いた。Seagrass Mapperは、Google社が提供するクラウド型の地球観測衛星の解析プラットフォームである「Google Earth Engine」をベースとし、図3-1に示すデータ処理フローによって、衛星画像から底質の分布を抽出することができる。今年度の解析に用いた衛星画像は、2021年8月7日に国分海浜公園周辺域が撮影されたWorldView-2のマルチスペクトル画像（図3-2）とした。

衛星画像による海底の藻場分布を推定には、太陽光の海底からの反射が用いられる。しかし、太陽光が海中に入り海底で反射し、海面から射出した光が宇宙空間にある人工衛星の光学センサーに届くまでには、その過程で通過する大気、水の層による影響を受けるとされている。そのため、藻場分布の推定には、これらの影響を事前に除去しておく必要があり、大気の影響を除

去するプロセスを大気補正処理、水の影響を除去するプロセスを水柱補正処理という。

大気補正には、底質からの光の反射がみられないような水深の十分深い場所の輝度値を全てのピクセルの放射輝度値から差し引くという手法が用いられる。これは暗画像法と呼ばれ、海底からの放射がなく、大気的气体分子とエアロゾルの散乱光、そしてそれらの相互作用が一様であると仮定の上に成り立ち、簡易的な大気補正の手法としてしられている。ここでは、Seagrass Mapper で大気補正処理を行う教師データとして、2箇所の深い海域のポリゴンデータを大気補正処理用に予め準備した(図 3-3)。

水柱補正には、水深データを使用する方法の Bottom Reflectance Index (BRI) (Sagawa et al., 2010) と使用しない方法の Depth Invariant Index (DII) (Lygenga, 1981) の 2 種類が用いられる。解析の対象海域の水深データが入手可能な場合は BRI 法が、水深データが入手できない場合は DII 法が用いることが推奨されている (Komatsu et al, 2020)。いずれの方法も、底質が砂泥のみ、もしくはアマモが殆どないような異なる水深帯の場所の情報が必要となるため、2021 年 7 月 6 日の水中ビデオカメラ映像を参考に、そのような場所のポリゴンデータを作成した (図 3-3)。これは、海中の存在する海藻や海草、岩礁からの光の反射の影響を受けない場所で、水深と共に減衰する光の情報のみを取得し、その情報から水深により減衰する光の情報を補正するためである。今年度の解析では、BRI 法と DII 法による水柱補正処理を実施した上で、分類結果について比較することとした。衛星画像の分類に必要な教師データの作成には、2021 年 7 月 6 日に撮影した水中ビデオカメラの映像データを使用した。また、アマモ場に関しては、海草が確認できた全てのデータから被度 3 以上のものを選んだ。人工衛星画像の底質分類の手法としては、ランダムフォレストによる教師付き分類を採用することとした。この手法では画像上の一部の場所において実際に現場の底質を確認し、その情報(底質の種類)を画像上のピクセルに関連付けた上で、画像分類する必要がある。そこで、アマモ場(緑)、岩礁性藻場(赤)、砂泥(黄色)の 3 つの底質に分類し、取得した現場の底質データから教師データを設定した(図 3-4)。

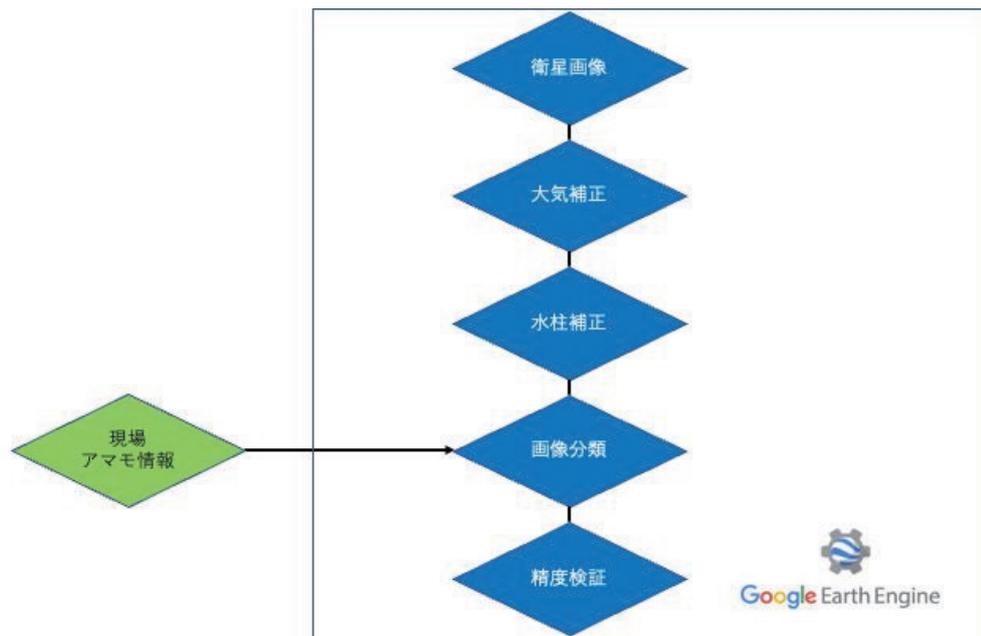


図 3-1 Seagrass Mapper による画像解析フロー



図 3-2 2021 年 8 月 7 日の WorldView-2 のマルチスペクトル RGB 合成画像



図 3-3 大気補正（白）及び水柱補正（水色）に用いたポリゴンデータ

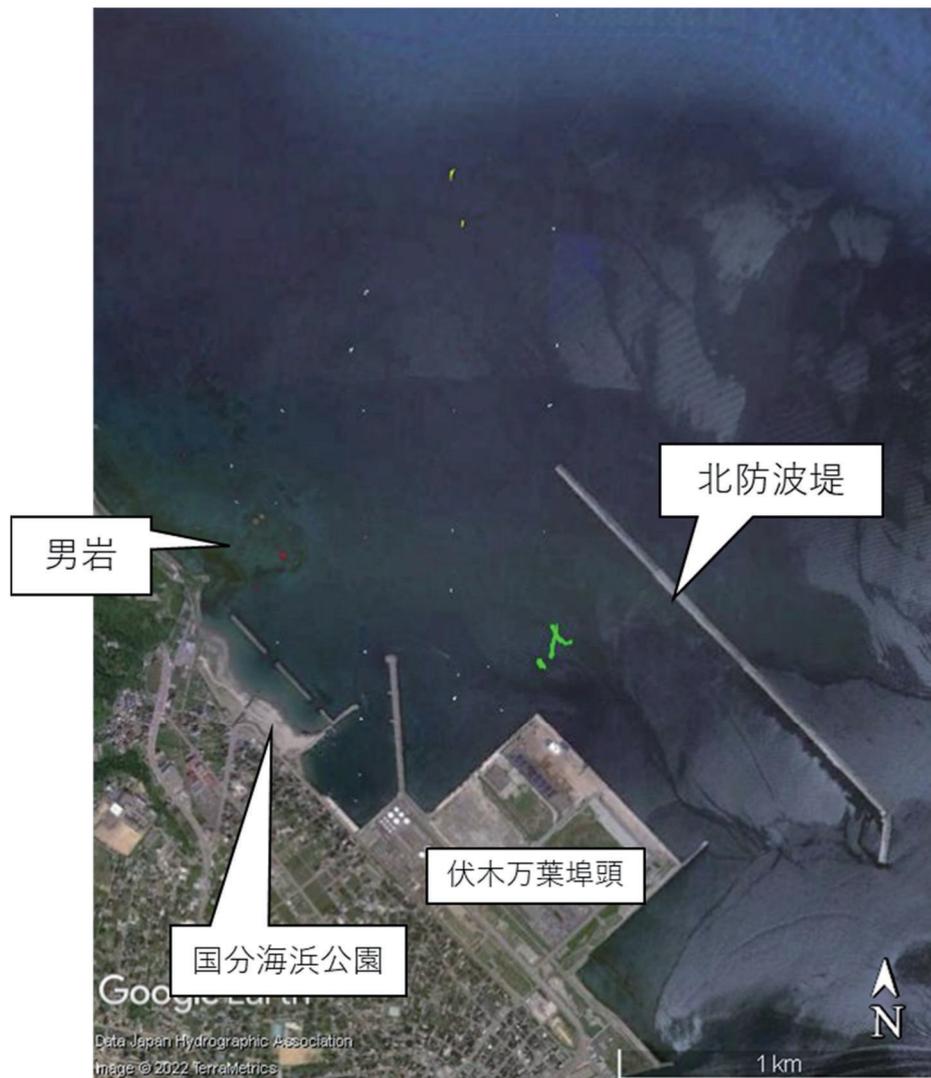


図 3-4 水中ビデオカメラ観測（2021 年 7 月 6 日）による底質調査に基づき作成した教師データ
（アマモ場；緑、岩礫性藻場；赤、砂泥；黄色）

3-3 結果と考察

Seagrass Mapper を用いて、暗画素法による大気補正と 2 種類の水柱補正（BRI 補正と DII 補正）により補正処理した 2021 年 8 月 7 日の国分海浜公園周辺の WorldView-2 マルチスペクトル画像の R・G・B バンドのデータを用いて、同年 7 月 6 日に取得した教師データの 7 割をランダムに抽出し、ランダムフォレスト法による底質分類を実施した。残りの 3 割の教師データは、分類結果の検証用データとして使用することとした。これらの方法で得られた国分海浜公園周辺の底質情報の分類結果を図 3-5、3-6 に示す。精度検証の結果からは、BRI 法で水柱補正処理をした画像の方が、全体の精度及び Tau 係数が高かった（表 3-1、表 3-2）。BRI 法で水柱補正処理後に、ランダムフォレスト法でこの精度検証の結果は、全体精度が 93.85%と非常に高い値であったが、これはあくまで分類用の教師データの場所における分類結果を示すものであるため、必ずしも画像全体の分類処理が正確になされたというわけではない。この度画像分類に使用したランダムフォレスト法は、機械分類用のアルゴリズムであり、より多くの分類用教師データがある場合に有用であるが、図 3-4 で示した分類用教師データ数程度では、画像全体に対

する分類は不正確となる可能性が低くなる。そのため、分類用教師データが少ない場合においても、有効な最尤法等の画像分類アルゴリズムを Seagrass Mapper に実装することが求められる。

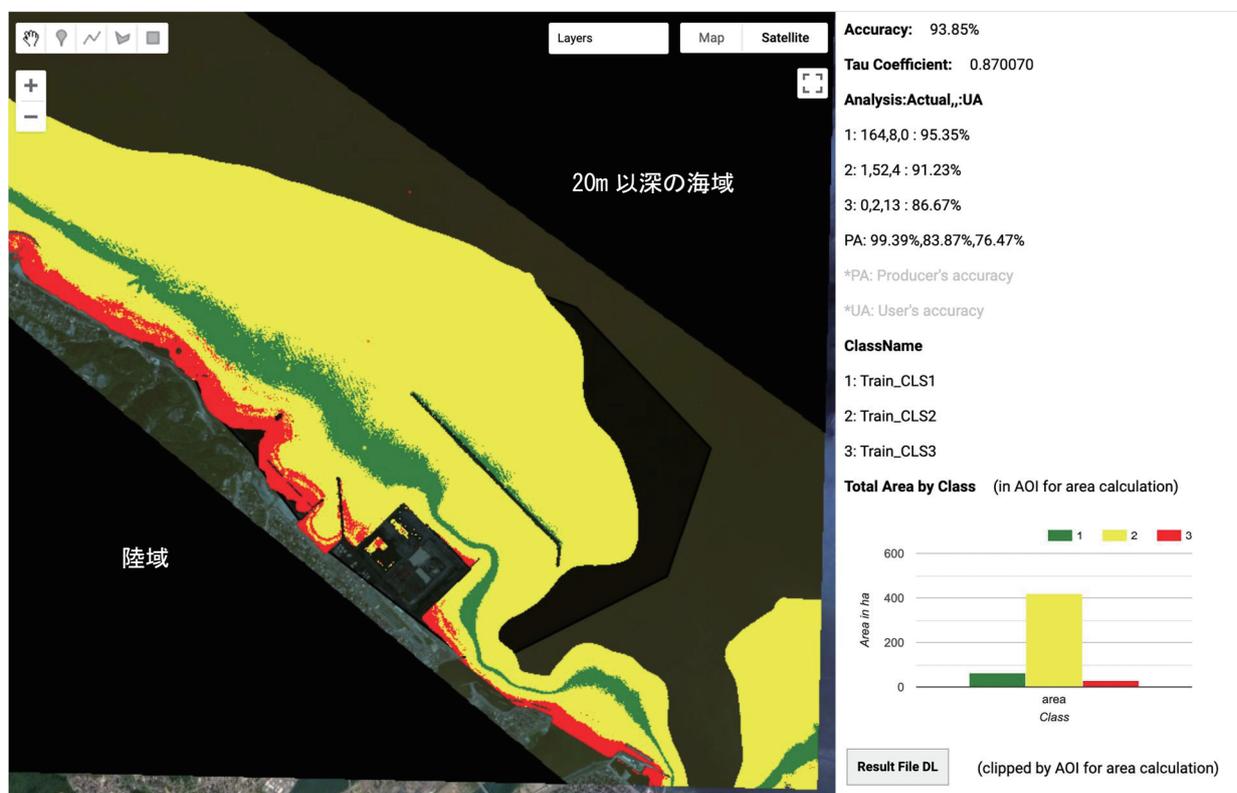


図 3-5 2021 年 8 月 7 日の WorldView-2 マルチスペクトル画像を暗画素法による大気補正、BRI 法による水柱補正後、ランダムフォレスト法により分類した国分海浜公園周辺における底質分類結果

表 3-1 底質分類結果（図 3-5）に対応する精度検証の結果

底質の分類	参照データ（評価データ）			ユーザー精度
	アマモ場	砂地	ガラモ場	
アマモ場	164	8	0	95.35%
砂地	1	52	4	91.23%
ガラモ場	0	2	13	86.67%
プロデューサー精度	99.39%	83.87%	76.47	
全体の精度	93.85%			
※Tau 係数	0.87			

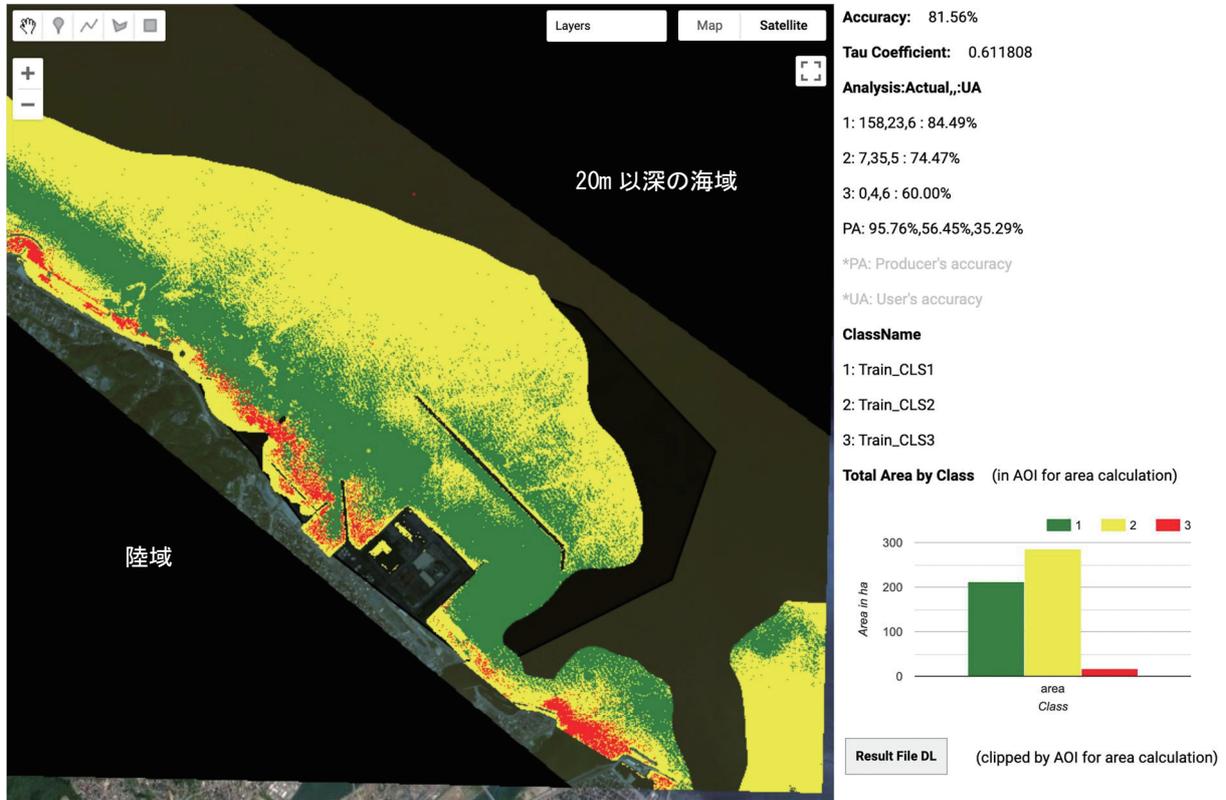


図 3-6 2021 年 8 月 7 日の WorldView-2 マルチスペクトル画像を暗画素法による大気補正、DII 法による水柱補正後、ランダムフォレスト法により分類した国分海浜公園周辺における底質分類結果

表 3-2 底質分類結果（図 3-6）に対応する精度検証の結果

底質の分類	参照データ（評価データ）			ユーザー精度
	アマモ場	砂地	ガラモ場	
アマモ場	158	23	6	84.49%
砂地	7	35	5	74.47%
ガラモ場	0	4	6	60.00%
プロデューサー精度	95.76%	56.45%	35.29	
全体の精度	81.56%			
※Tau 係数	0.61			

4. ドローンを用いた藻場の空撮

4-1 目的

広範囲な藻場分布域の推定には人工衛星リモートセンシングによる藻場マッピングが望ましいが、藻場分布域の推定が可能なマルチスペクトルセンサを搭載した人工衛星は、その回帰日数が長く、雲や風浪の影響を受けることから、藻場の季節的な変動の把握は難しい。このため、近年、空撮などを中心に産業利用が急速に進んでいる小型無人航空機（ドローン）を用いた藻場の分布調査を行い、その利用可能性を検討する。

4-2 方法

(1) 空撮範囲

高岡市国分海浜公園周辺の藻場分布域の内、青線内の海域（沿岸から最大約1.2kmの範囲）を撮影した（図4-1）。なお、過去の撮影で、ドローンとプロポの距離が遠いためと考えられる電波障害が生じたため、今年度も空撮範囲を2区分して空撮を行った。

今年度は、富山県農林水産総合技術センター水産研究所の調査に合わせる形で、氷見市比美乃江公園沖合の浅海域（沿岸から最大1.0kmの範囲）も撮影した（図4-1）。こちらも空撮範囲を北と南に2区分して空撮を行った。

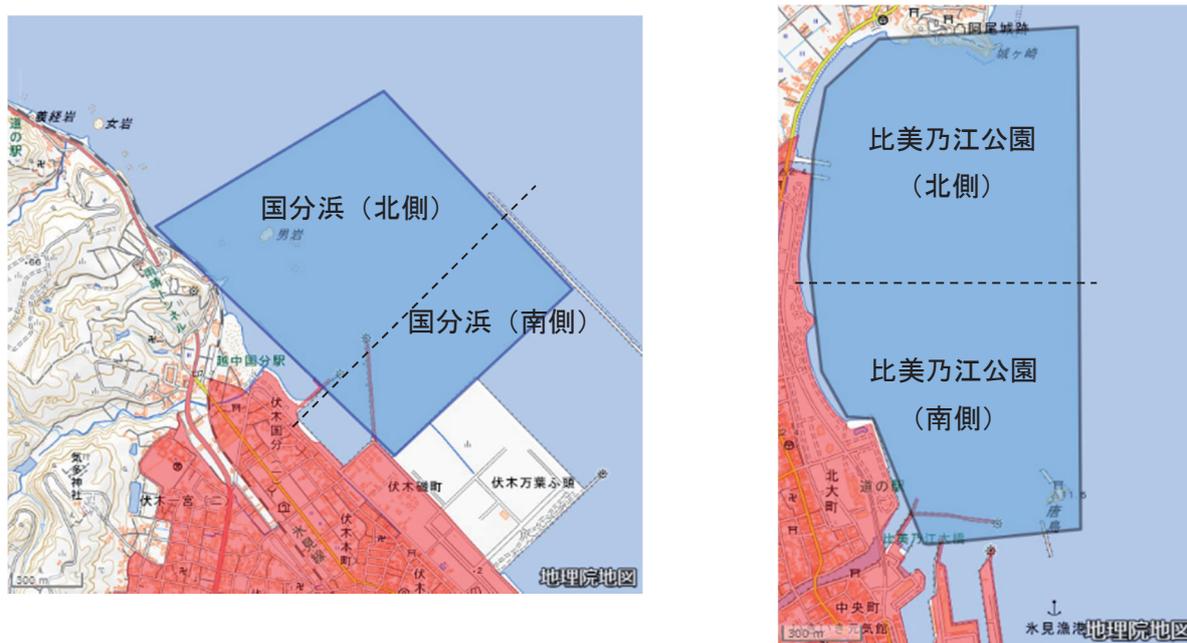


図4-1 空撮範囲 左：高岡市国分海浜公園沖、右：氷見市比美乃江公園沖
（国土地理院の地図をもとに作成）

(2) 機材

ドローンはDJI社製のPhantom4 Proを使用した。
機材写真を図4-2に、詳細なスペックを表4-1に示す。



図4-2 DJI Phantom4 Pro

(<https://www.dji.com/jp/phantom-4-pro>)

表4-1 DJI Phantom4 Pro スペック

機体		カメラ	
重量(バッテリー、プロペラ込)	1388g	センサー	1インチCMOS
対角サイズ(プロペラ除く)	350mm		有効ピクセル数:2,000万画素
最大上昇速度	Pモード:5m/s	レンズ	FOV(視野角)84°
最大下降速度	Pモード:3m/s		8.8mm(35mm半換算:24mm)、f/2.8~f/11
最大速度	Pモード:50km/h		オートフォーカス(1m~∞)
運用限界高度	6,000m	ISOLレンジ	写真:100~12800(マニュアル)
最大風圧抵抗	10m/s	メカニカルシャッター	8~1/2000s
最大飛行時間	約30分	電子シャッター	8~1/8000s
動作環境温度	0~40℃	画像サイズ	アスペクト比3:2:5472×3648
GPS測位システム	GPS/GLONASS		アスペクト比4:3:4864×3648
ジンバル			アスペクト比16:9:5472×3078
操作可能範囲	ピッチ:-90° ~+30°	静止画モード	シングルショット
角度制御精度	±0.02°		バーストモード:3/5/7/10/14枚
送信機			オート露出ブラケット(AEB): 0.7EV ステップでの3/5/7/10/15/20/30/60秒 インターバル:2/3/5/7/10/15/20/30/60秒
動作周波数	2.400~2.483GHz	対応ファイル形式	FAT32(32GB以下)、exFAT(32GB超)
最大伝送距離	日本仕様4km	静止画モード	JPEG,DNG(RAW),JPEG+RAW
動作環境温度	0~40℃	対応SDカード	microSD
バッテリー			最大容量128GB書込速度≥15MB/s
バッテリータイプ	LiPo4S		クラス10またはUHS-1規格が必要
電力量	89.2Wh		
動作環境温度	0~40℃		

（３）自動飛行アプリの使用

撮影では、ドローン機体と同じ製造元である DJI 製の自動飛行アプリ「DJI GS PRO」を使用した。自動飛行アプリを使用することにした理由は以下の通りである。

- ・飛行高度、オーバーラップ率、サイドラップ率、飛行速度、撮影間隔、カメラ角度、コースアングル、カメラ方向等を設定できる。
- ・飛行ルートが自動で作成され、飛行時間や必要なバッテリー本数を事前に知ることができるため、効率よく撮影でき、事故発生リスクを最小にできる。
- ・事前に飛行計画データを作成し保存することができ、２回目以降のフライトではその飛行計画データの再利用・編集が可能であるため、継続的かつ同条件の空撮が容易である。

その他、GS PRO は自動飛行の一時停止機能があり、フライトの途中でドローンを着陸させてバッテリーを交換し、その後、中断箇所から自動飛行および撮影を再開することができる。

（４）撮影条件と設定

GS PRO における飛行計画の設定手順は以下のとおりである。飛行計画設定画面の一例を図 4-3 に示す。

- ①計測撮影領域モードを選択。
- ②地図上指定を選び、地図をタップして飛行領域を作成する。
- ③「基本設定」でカメラモデル、カメラ方向、撮影モード、飛行経路生成モードを選択する。
- ④飛行高度を設定する。
- ⑤飛行速度、撮影間隔、写真の地上解像度、飛行ルート（緑線）は自動的に決定される。
- ⑥「詳細設定」で重複率（オーバーラップ、サイドラップ）とコースアングル、カメラ角度（ジンバルピッチ）を設定する。

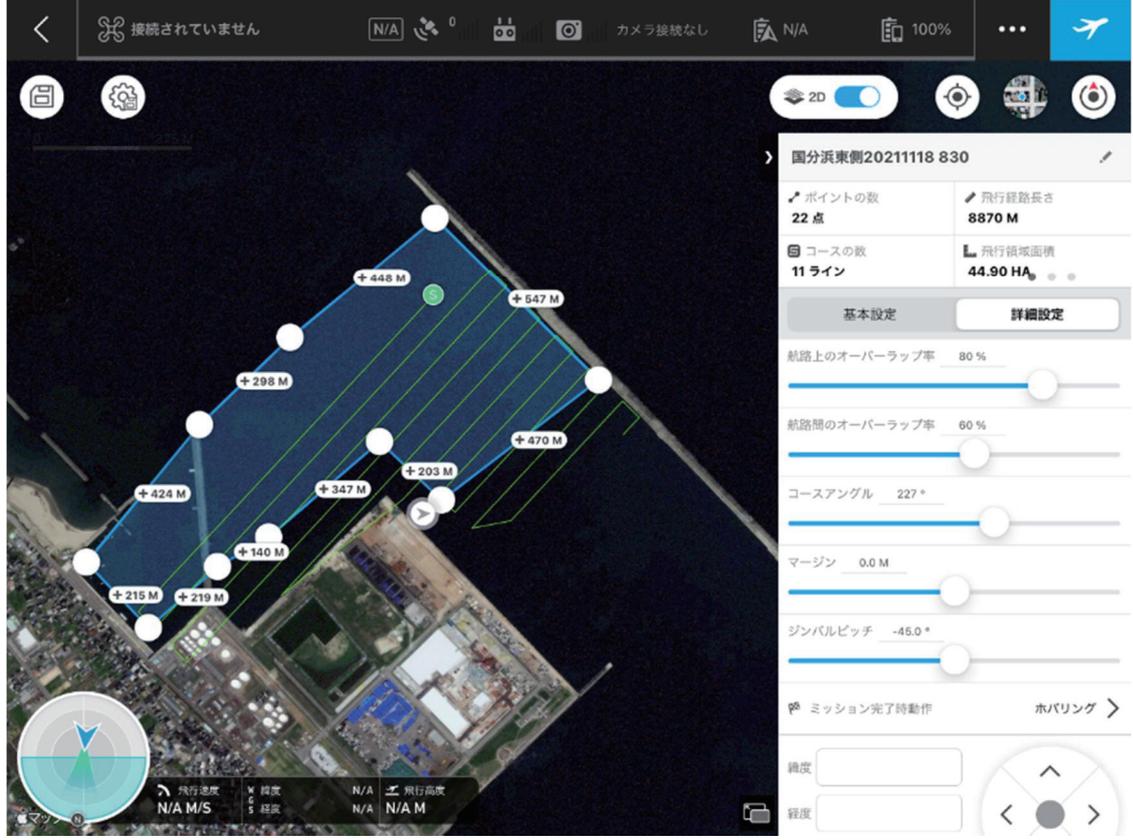
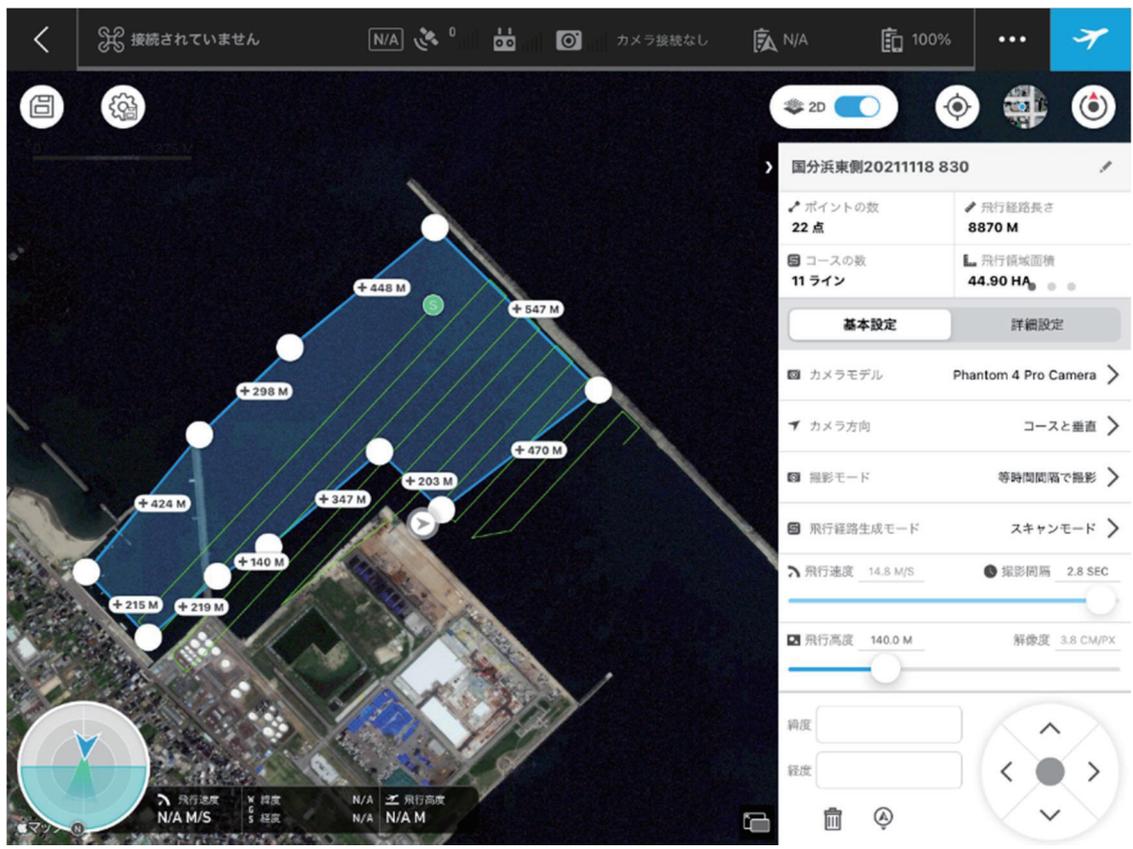


図 4-3 GS PRO 飛行計画設定画面の例 上：基本設定、下：詳細設定

(5) 撮影に関する各種設定

①オーバーラップ率

昨年度の調査で、オーバーラップ率を 80%、サイドラップ率を 60%に設定して画像合成の成功率が向上したので、今年度も同様のオーバーラップ、サイドラップ率で撮影を行った。

②撮影条件

2019 年度は、GS PRO で3条件（露出オート、露出固定、ISO 感度を上げる。）を設定して撮影を行い、オルソモザイク画像に合成した結果、大きな違いが認められなかった。そのため、2020 年度は設定が容易な露出オートのみで撮影し、撮影結果からカメラの設定による違いは見られなかったため、今年度も同様に露出オートに設定して撮影を行った。

③使用フィルタの決定方法

藻場の撮影では海面の偏光の影響を大きく受けるため、これを軽減させるために円偏光フィルタ（CPL）を使用することとした。円偏光フィルタの効果を最大にするには、フィルタを回転させて、太陽高度・太陽方位、カメラ（ドローン）、撮影対象の相対的な位置関係に応じた適切な角度に設定する必要がある。しかしながら、飛行中に円偏光フィルタを回転させることは困難であるため、あらかじめ海面に対しスリットを垂直状態にし、理論上効果が最大となる設定とした。

撮影では、PolarPro 製 ND-CPL フィルタ（ND4-PL、ND8-PL、ND16-PL）を準備した。ND-CPL フィルタは ND（減光）の効果も兼ね備えており、ND4-PL フィルタは CPL フィルタと比べて光量を 1/4 に、ND8-PL フィルタは光量を 1/8 に、ND16-PL フィルタは光量を 1/16 に抑えることができる。天候を考慮して、これらの3種類のうち最も効果的なフィルタを選択してドローンに取り付ける。今年度は、フィルタの使用について撮影日の条件により適宜検討し、夏季は使用せず、秋季に ND4-PL フィルタを使用し撮影を行った。

④カメラ角度（コースアングル）の設定条件

2019 年度の調査の結果をもとに、撮影は太陽高度が 30° ～45° に近い時間帯にして、ドローンの撮影方向はサングリントを回避するために太陽を背にした順光方向に設定することにした。方位角は空撮範囲の中間地点の座標を基準とした（図 4-4）。

昨年度までと同様に今年度も、夏季、秋季ともに撮影時間帯の太陽方位に合わせたコースアングルを設定することとした。コースアングルが陸から沖となる場合には、特徴点（陸地）が少なくなることから撮影した画像では画像合成が成功しない可能性があるが、太陽方位を重視してコースアングルを設定した。

⑤カメラ方向の設定条件

2020 年度の調査から、カメラ方向をコースに垂直にすることで、画像合成の成功率が高くなることがわかった。これは、カメラと被写体との距離のずれがカメラを進行方向に対して垂直に向けると小さくなり、特徴点（合成する際の画像の共通点）が正しく捉えられるためと考えられる。

今年度はすべての撮影において、カメラ方向をコースに対して垂直右向きとした。GS PRO アプリのコースアングルは真東を 0 度とし反時計回り、太陽方位は真北を 0 度とし時計回りで表記され

るため、現場で太陽方位に合わせてコースアングルを設定する場合、混乱しやすい。GS PRO アプリに設定するコースアングルは「360-太陽方位」で簡単に求めることができる。

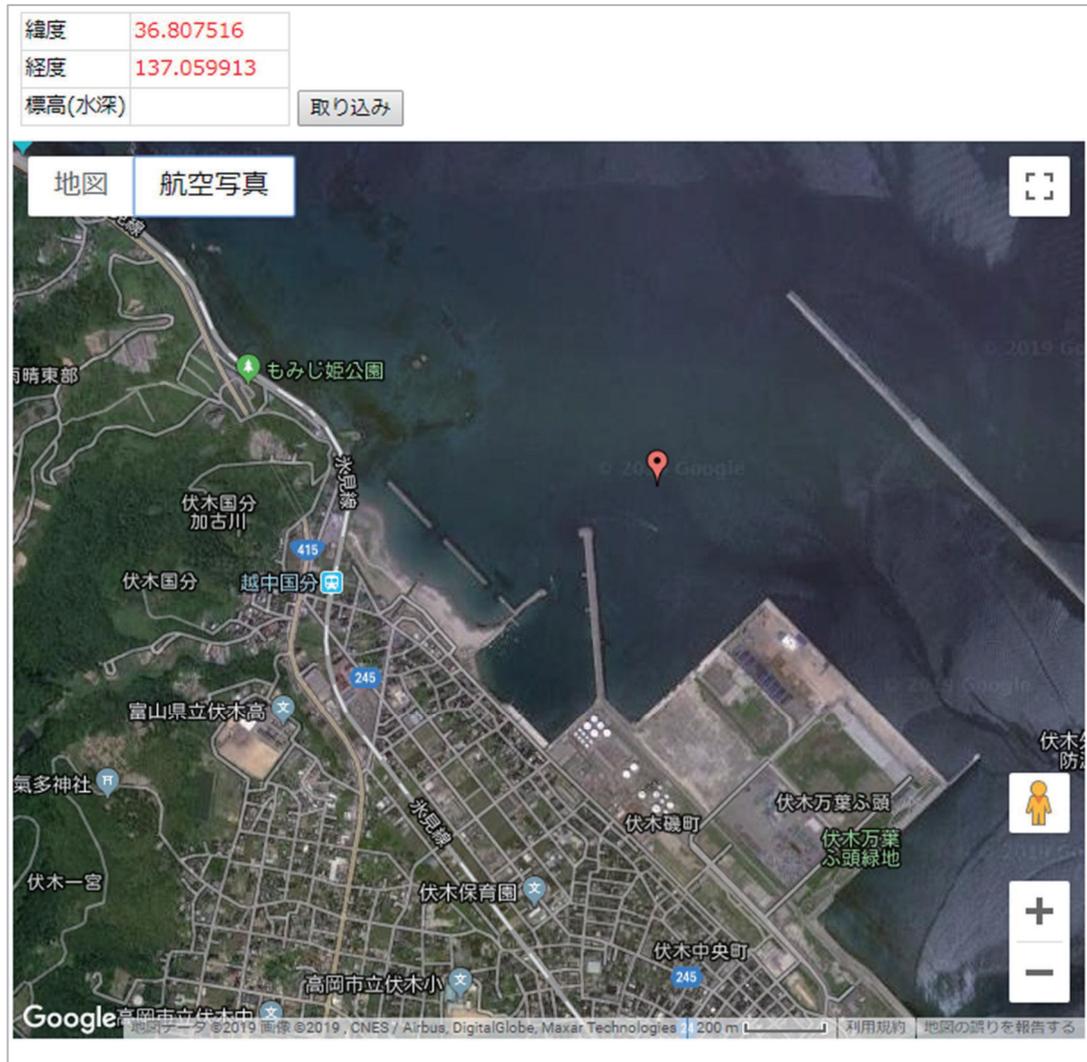


図 4-4 国分海浜公園の太陽高度・方位の基準地点

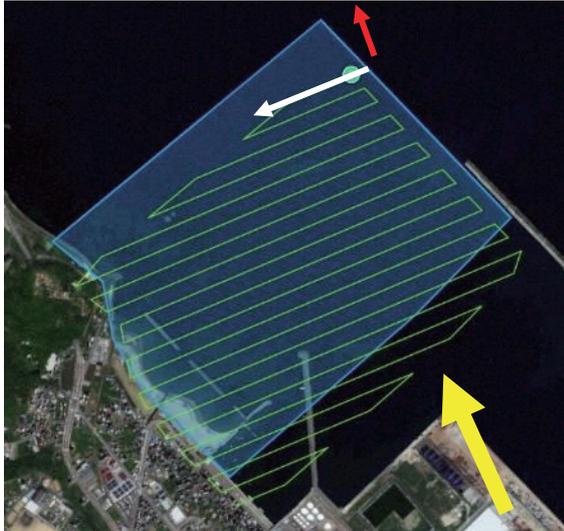


図 4-5 太陽方位に合わせた冬のコースアングルの例
黄色：太陽光照射方向、白：ドローン飛行方向、赤：カメラ撮影方向

(6) オルソモザイク画像の作成

空撮により得られた画像は、Agisoft 社製の写真測量ソフトウェア Metashape Professional を用いて処理し、3次元モデルおよびオルソモザイク画像を作成した。Metashape Professional は、航空写真から高解像度の DEM データおよびテクスチャー付きのポリゴンモデルと GCP を含む 5cm 以内の精度を持ったオルソフォト出力(歪みの無い正投影写真)を生成することができるソフトウェアである。

1) 画像処理手順

基本処理の流れは以下の通りである。

①写真を追加 (Add Photos)

空撮画像をソフトウェアに取り込む。

②写真のアラインメント (Align Photos)

各写真上で特徴点を発生させ、その配置から隣接画像および撮影場所および方向の相対的な位置関係を推定 (SfM)。

③高密度クラウド構築 (Build Dense Cloud)

②で推定したカメラ位置・方向および各画像の深度マップから、高密度点群を生成 (MVS)。

④メッシュ構築 (Build Mesh)

高密度点群をもとに、不整三角形網の面データを生成。

⑤オルソモザイク構築 (Build Orthomosaic)

メッシュデータをもとにオリジナル画像をオルソ化し、画像を繋ぎ合わせる。

2) Metashape パラメータの調整

Metashape による処理において、いくつかの変更可能なパラメータがあり、処理する画像群の性質（撮影対象物の表面構造の複雑さ、明るさ、写真の重複率、解像度など）とパラメータの組み合わせにより、作成される3次元モデルの精度やオルソモザイク画像の品質、データ処理時間等に影響する。このため、2019、2020年度にMetashape 処理パラメータの調整を検討し、詳細は令和2年度の本報告書で報告済みである。これまでの検討結果を基に、今年以下は以下のAlignment 条件で計算した。

- ①Accuracy : Low
- ②Generic preselection : チェック有
- ③Reference preselection : チェック有
- ④Key point limit : 40,000
- ⑤Tie point limit : 4,000
- ⑥Adaptive camera model fitting : チェック有

4-3 結果

(1) 飛行条件

飛行条件は 以下の通りとした。

・夏季調査

【2021年7月19日】 国分海浜公園

オーバーラップ率	: 80%
サイドラップ率	: 60%
飛行高度	: 140m
地上解像度	: 3.8cm/px
飛行速度	: 14.8m/s
撮影間隔	: 2.8 秒
カメラ角度	: -45°
カメラ方向	: コースに垂直 (右)
使用フィルタ	: なし
撮影条件	: オート

国分浜 (北側)

飛行経路	: 約 21km
撮影範囲	: 約 105ha
バッテリー必要数	: 2 個
撮影枚数	: 570 枚
飛行予測時間	: 約 28 分 (バッテリー交換の時間は含まない)

国分浜 (南側)

飛行経路	: 約 10km
撮影範囲	: 約 49ha

バッテリー必要数 : 1 個
撮影枚数 : 253 枚
飛行予測時間 : 約 14 分 (バッテリー交換の時間は含まない)

【2021年7月21日】 比美乃江公園

オーバーラップ率 : 80%
サイドラップ率 : 60%
飛行高度 : 140m
地上解像度 : 3.8cm/px
飛行速度 : 14.8m/s
撮影間隔 : 2.8 秒
カメラ角度 : -45°
カメラ方向 : コースに垂直 (右)
使用フィルタ : なし
撮影条件 : オート

比美乃江公園 (北側)

飛行経路 : 約 13.6km
撮影範囲 : 約 68ha
バッテリー必要数 : 2 個
撮影枚数 : 398 枚
飛行予測時間 : 約 18 分

比美乃江公園 (南側)

飛行経路 : 約 15km
撮影範囲 : 約 74ha
バッテリー必要数 : 2 個
撮影枚数 : 263 枚
飛行予測時間 : 約 20 分

・ 秋季調査

【2021年11月18日】 国分海浜公園

オーバーラップ率 : 80%
サイドラップ率 : 60%
飛行高度 : 140m
地上解像度 : 3.8cm/px
飛行速度 : 14.8m/s
撮影間隔 : 2.8 秒
カメラ角度 : -45°
カメラ方向 : コースに垂直 (右)
使用フィルタ : ND4-CPL

撮影条件 : オート

国分浜（北側）

飛行経路 : 約 21km

撮影範囲 : 約 105ha

バッテリー必要数 : 2 個

撮影枚数 : 575 枚

飛行予測時間 : 約 28 分

国分浜（南側）

飛行経路 : 約 6km

撮影範囲 : 約 25ha

バッテリー必要数 : 1 個

撮影枚数 : 152 枚

飛行予測時間 : 約 8 分

（2）空撮結果（夏季）

【2021年7月19日】 国分浜

一連の空撮画像のうち、藻場が目視で確認できた写真などを写真4-1,2に示す。当日の透明度は高く、岸寄りの部分は海面の反射光も少なく岩礁性藻場を鮮明に撮影できた。水深の深い男岩の沖側や小矢部川河川水の影響の強い伏木万葉埠頭西側先端（北防波堤内側）は不鮮明で、水中ビデオカメラ調査で確認された埠頭西側先端のアマモ場は写らなかった。

男岩の沖には鍵型の特徴的な構造物が存在するが、写真ではぼんやりと確認できる程度であった（写真4-1左下）。当日の透明度は計測していないが、このような比較対象となる岩礁等を決め、撮影日や撮影機材の設定によってどのように写るか比較検討に用いることができる。

岩礁性藻場は岩礁自体がはっきりと写真に写るが、岩礁の上に藻場が繁茂しているかどうかは、ドローン画像からだけでは判別しづらい。現場データを取得し、確かに藻場である場所の画像データがなければ、不変の岩礁域の面積をモニタリングし続けることになるので注意が必要である。

国分海浜公園前の写真では、潜堤を確認でき、この構造物も透明度の指標として利用できる（写真4-1右下）。

また、ほぼ同じ場所を撮影した写真で、色合いが異なる事があった。写真4-2の下段は、万葉埠頭西側先端を含む写真2枚を、同じ構図となるように切り取ったものだが、海の色合いが異なっている。カメラの撮影条件をオートにしていたことにより、陸地が多く写る場合は白が強い陸とのコントラストで海は青が強く写り、逆に陸地が少ししか写らないときは海が黄や緑が強く写っていた。海の青が強いときはシャッタースピードが1/200秒で、海の黄、緑が強い時は1/160秒で撮影されていた。このようなカメラのシャッタースピード等の設定の自動的な変更により、岸と沖の画像に実際の海の色合いとは異なる違いが発生しており、オルソモザイク画像も岸近くは青く、沖は黄色く合成されると考えられる。この問題点を解決するためには、カメラ設定はマニュアルとし、撮影条件は固定することを再度検討した方が良いと思われる。

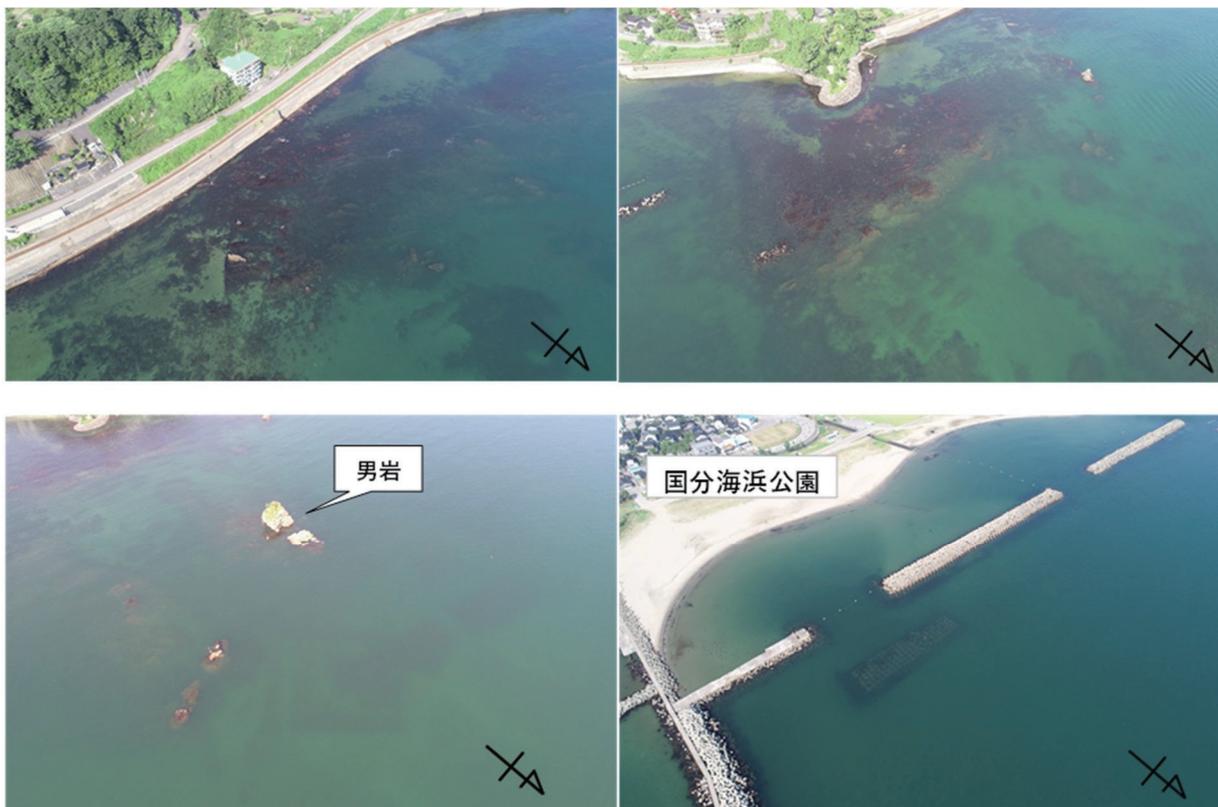


写真 4-1 夏季、国分浜沖の連続した空撮画像の一部(北側)



写真 4-2 夏季、国分浜沖の連続した空撮画像の一部(南側)

【2021年7月21日】 比美乃江公園

一連の空撮画像のうち、藻場が目視で確認できた画像などを写真4-3, 4に示す。当日の透明度は高く、北側の撮影では砂地に生えるモザイク状のアマモ類が写っている。また、余川川河口や阿尾城跡前では、雲の影が写り込み、藻場と区別が付きづらかった。

南側は、氷見漁港北防波堤の周りに色の濃い場所が存在したが、藻場か雲か判別できない。唐島周辺には藻場と思われる色の濃い場所が写ったが、島から離れると不鮮明になった。

撮影は南側、北側の順で行ったが、撮影中に北東風が強まり、北側の撮影時には風速6m/sまでになった。そのため、北側の水深が深いところや風の条件の厳しかった場所では海底がうまく撮影できていない。



写真 4-3 夏季、氷見沖の連続した空撮画像の一部(北側)

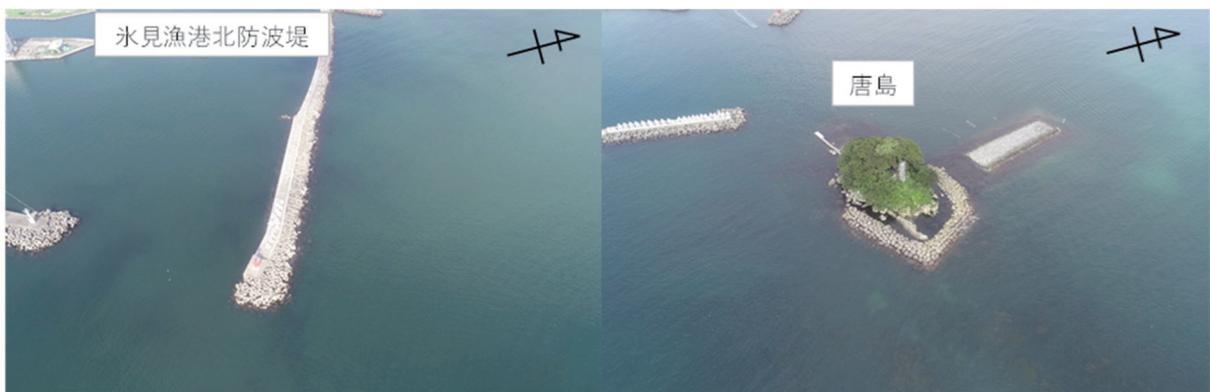


写真 4-4 夏季、氷見沖の連続した空撮画像の一部(南側)

(3) 空撮結果 (秋季)

【2021年11月18日】

一連の空撮画像のうち、藻場が目視で確認できた画像などを写真4-5,6に示す。当日は透明度が比較的高く、浅海域の藻場を良好に撮影できた。男岩の沖にある鍵型の構造物が7月調査時点よりもはっきりと写っていることから、7月の調査時よりも透明度が高いと考えられる(写真4-5右下)。しかし、万葉埠頭西側先端付近の海底はドローン空撮で確認できず、アマモ場の痕跡を捉えることはできなかった。万葉埠頭西側先端付近では、魚群らしき影や航行する船の引き波が写っていた。



写真 4-5 秋季、国分浜沖の連続した空撮画像の一部(北側)

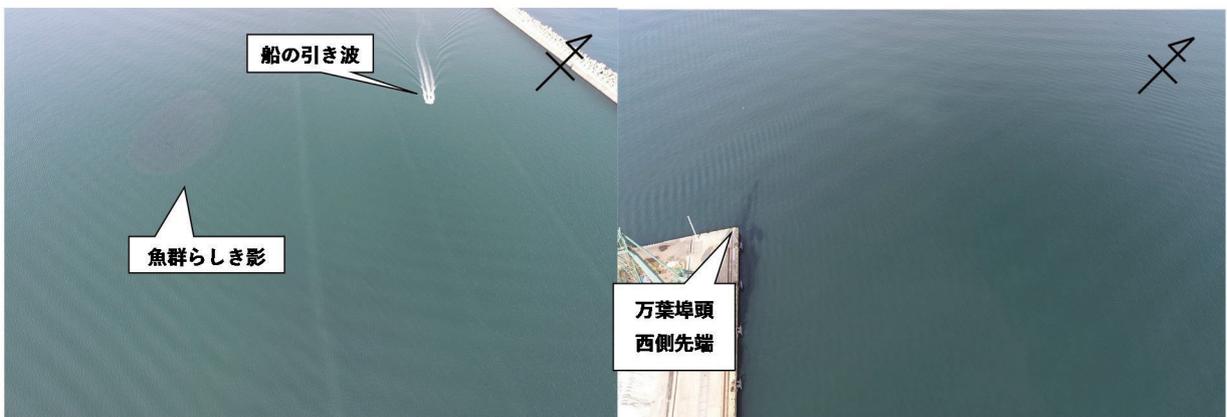
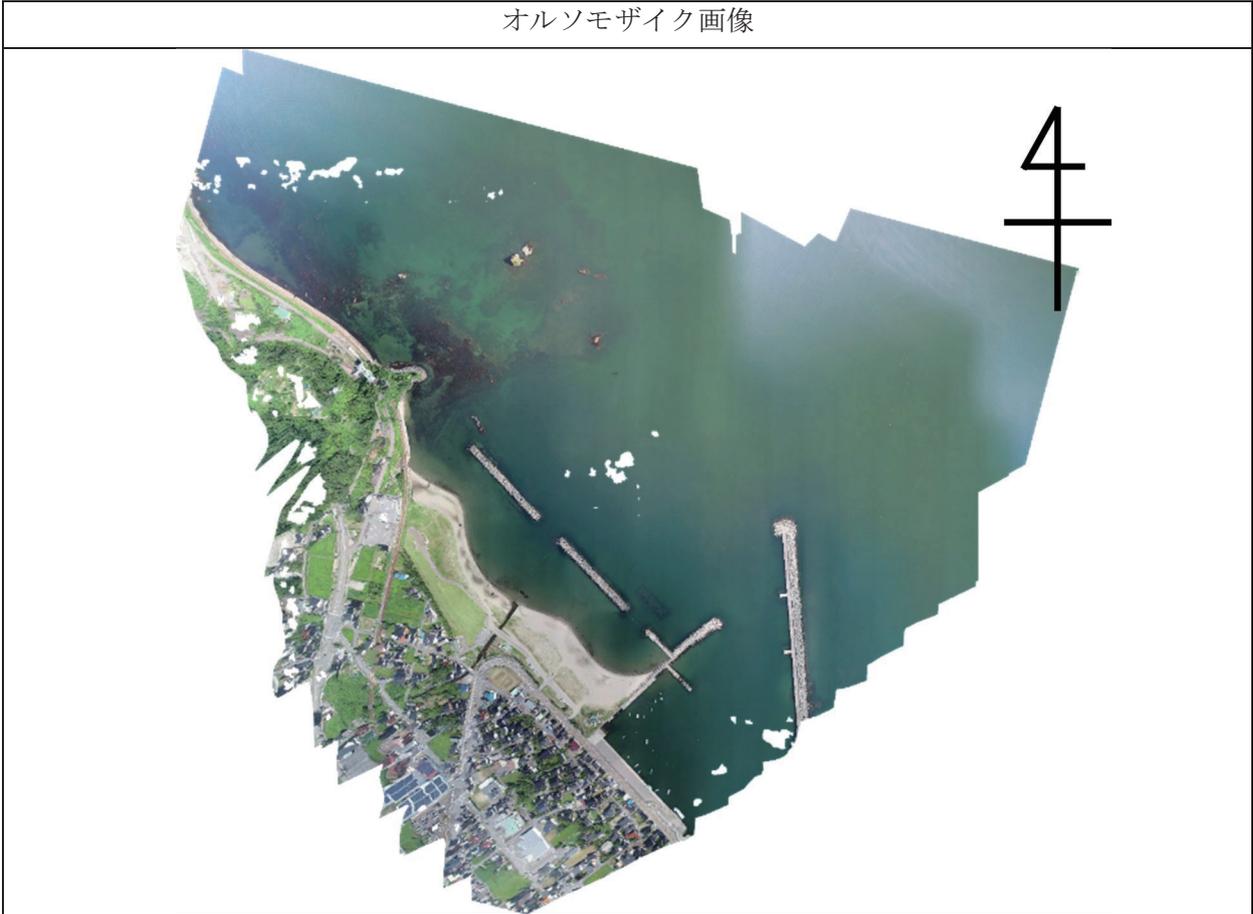


写真 4-6 秋季、国分浜沖の連続した空撮画像の一部(南側)

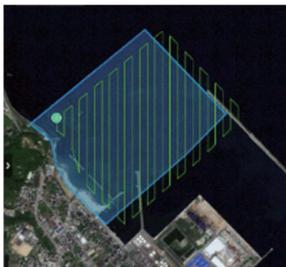
(4) オルソモザイク画像合成結果 (夏季)

【2021年7月19日】 国分浜 (北側) 8:18~9:14 (バッテリー交換回数…2回)

オルソモザイク画像



撮影条件



太陽高度 : 42° (8 : 30)

太陽方位 : 95° (8 : 30)

コースアングル : 270°

太陽方位 : 北を 0° (時計回りに正の値)

コースアングル : 東を 0° (反時計回りに正の値)

結果・検討事項

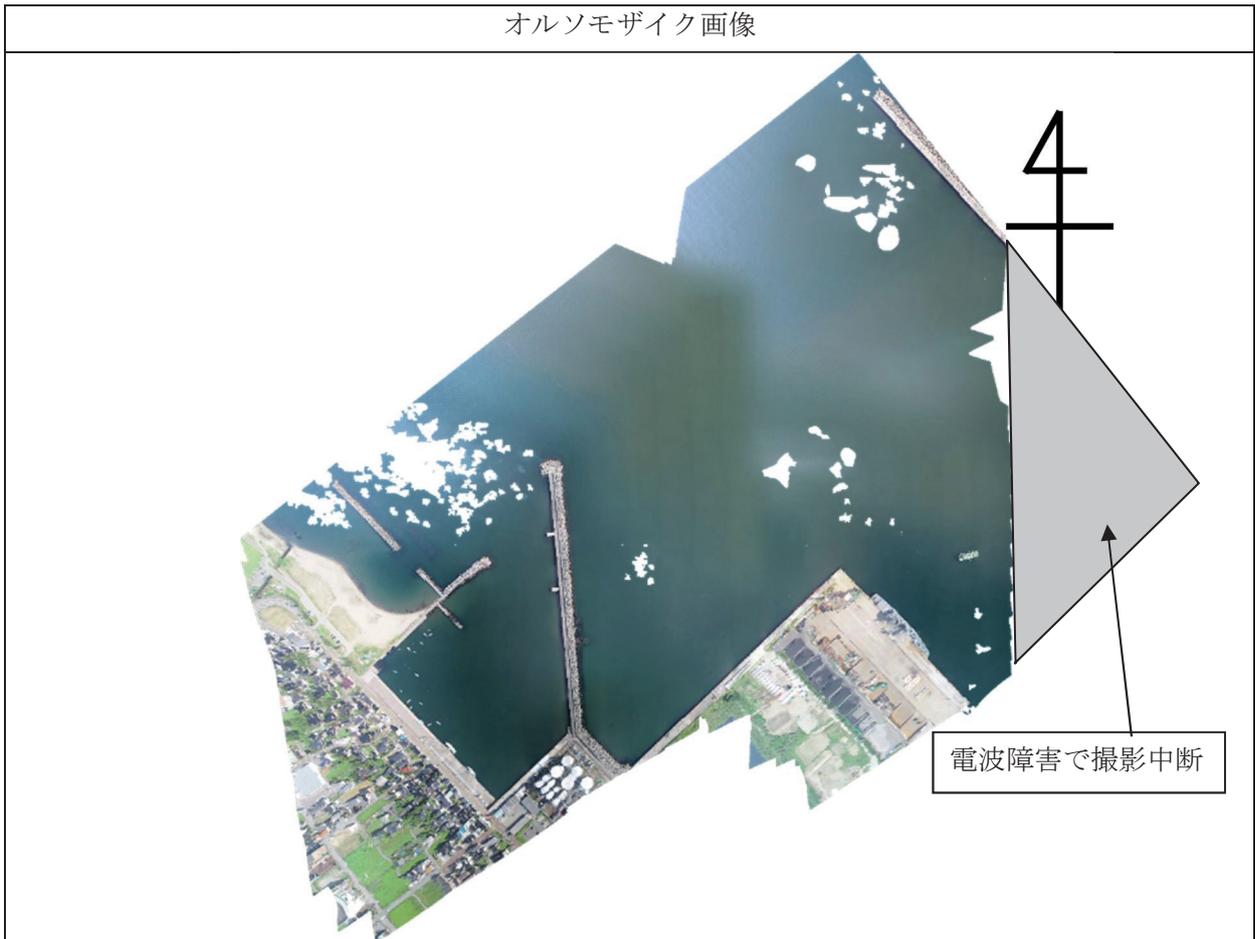
左側の浅場の岩礁性藻場が良好に確認でき、男岩より沖側の水深 6m以上の場所において藻場と砂底が分かれて見える。離岸堤の間にある潜堤を確認することができる。

南側から伸びる防波堤よりも沖側は、大きく合成に失敗し、画像合成ができていない。沖は特徴点が少ないため、合成が難しいと考えられる。

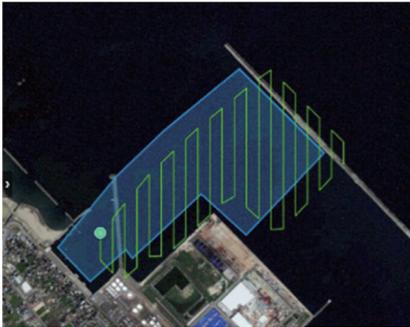
合成画像の色は、沖に行くほど緑色が強くなっており、これは実際の海の色の変化よりも、カメラ設定が自動で切り替わった影響と考えられる。沖側にサンダリントはないが、全体的に白けて、ぼんやりとしている。

【2021年7月19日】 国分浜（南側） 7:28～7:49（バッテリー交換回数…1回）

オルソモザイク画像



撮影条件



太陽高度：30°（7：30）

太陽方位：86°（7：30）

コースアングル：270°

太陽方位：北を0°（時計回りに正の値）

コースアングル：東を0°
（反時計回りに正の値）

結果・検討事項

電波障害と思われるトラブルで、右端の写真が撮れなかった。それ以外の部分では概ね画像合成できている。しかし、沖側の合成画像は緑がかり、不鮮明になっている。水中ビデオカメラ調査で確認された埠頭北西端まわりのアマモ場を確認することはできない。

【2021年7月21日】 比美乃江公園（北側） 8:34～9:08（バッテリー交換回数…1回）

オルソモザイク画像



撮影条件



太陽高度：42°（8：30）

太陽方位：95°（8：30）

コースアングル：270°

太陽方位：北を0°（時計回りに正の値）

コースアングル：東を0°

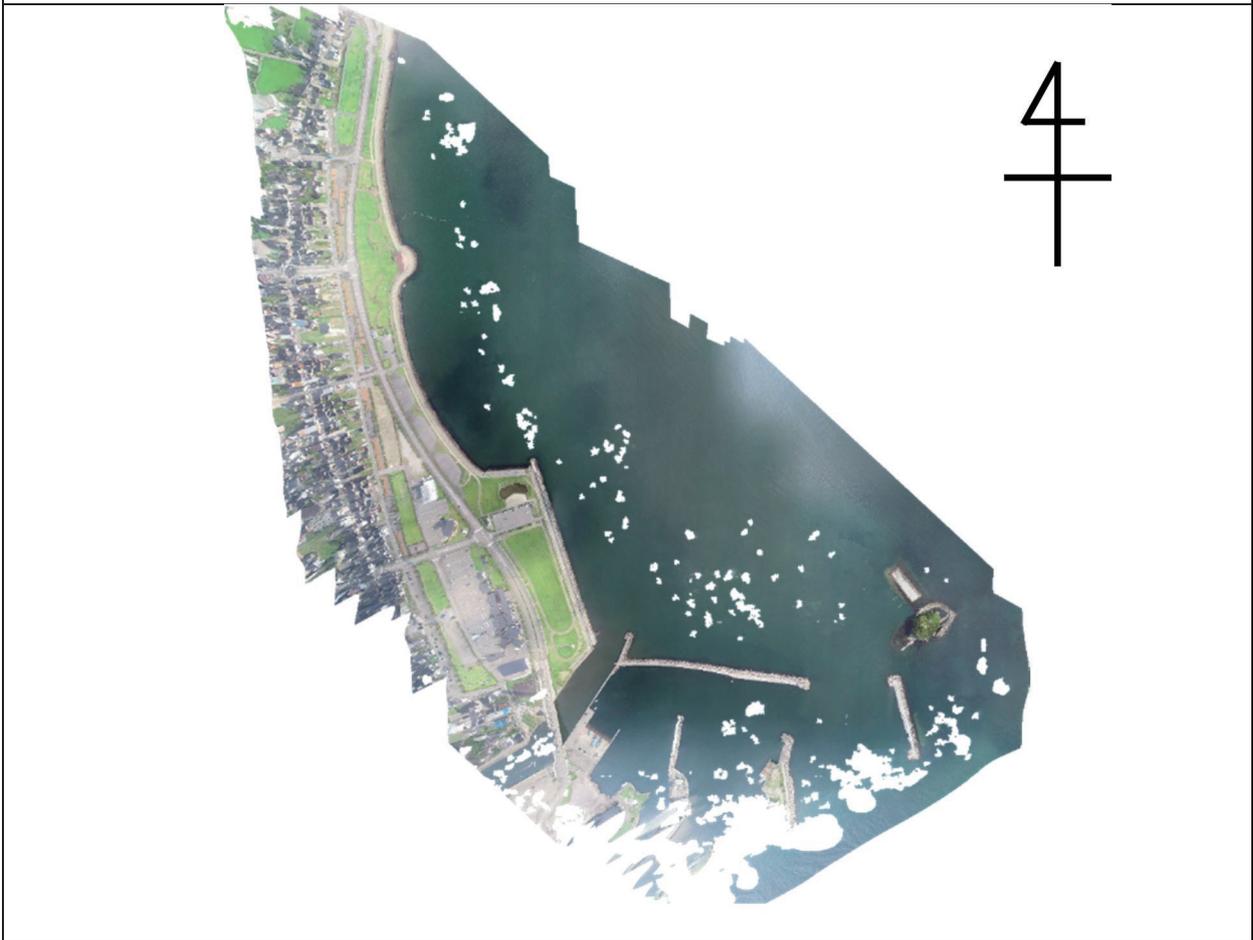
（反時計回りに正の値）

結果・検討事項

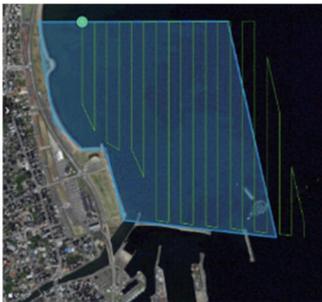
沖側右下の画像合成に失敗している。合成できた箇所は鮮明に映っており、余川川河口と北側の阿尾城跡下の岩礁性藻場がはっきりと確認できる。三の字型の潜堤の南側や、余川川河口の北側に若干色の違う場所が写っており、合成前の空撮画像や現場調査の結果から、アマモ場であると考えられる。合成画像は広範囲を一目で確認できるメリットがあるが、画像に写る底質のわずかな変化には気づきにくいので、注意が必要である。

【2021年7月21日】 比美乃江公園（南側） 8:06～8:18（バッテリー交換回数…0回）

オルソモザイク画像



撮影条件



太陽高度：30°（7:30）
太陽方位：86°（7:30）
コースアングル：270°
太陽方位：北を0°（時計回りに正の値）
コースアングル：東を0°
（反時計回りに正の値）

結果・検討事項

周囲の看板が原因と思われる電波障害が発生し、撮影開始が遅くなった。撮影範囲の右上部分で画像合成に失敗している。
唐島や氷見漁港付近は画像が白抜けし、合成できていない場所も多い。
比美乃江公園の岸近くは、黒い藻場のように見えるが、現場データで確認が取れていないため、確証が持てない。沖側は特徴点が少なく、灰色や白く合成されている。

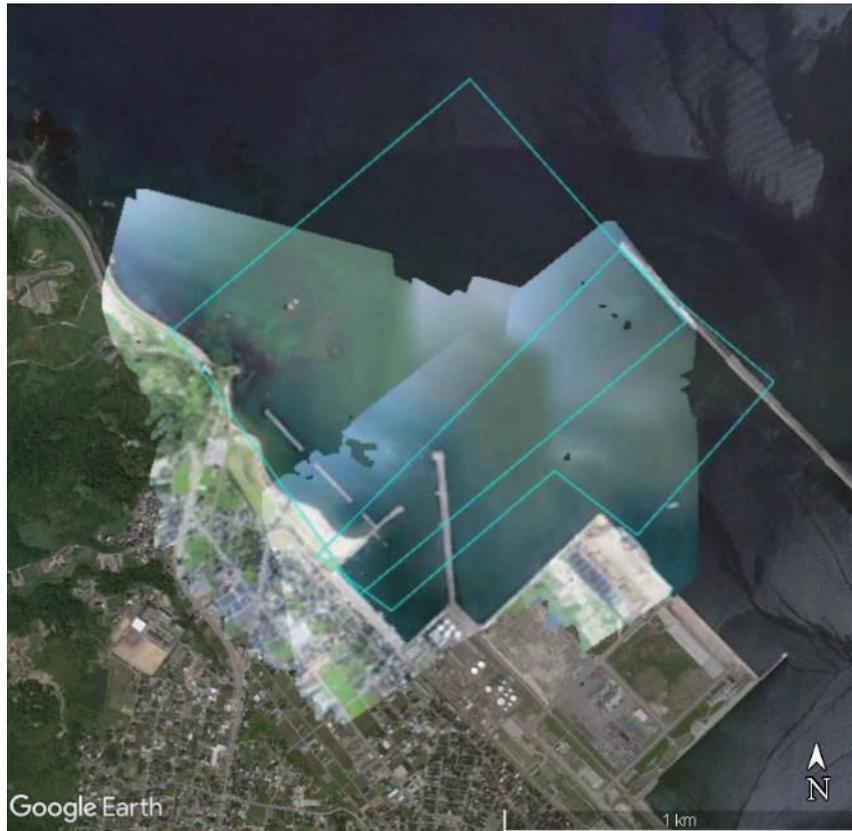


図 4-6 Google Earth 上に表示した国分浜(夏季)のオルソモザイク画像
水色の枠は、自動撮影アプリで設定した撮影範囲

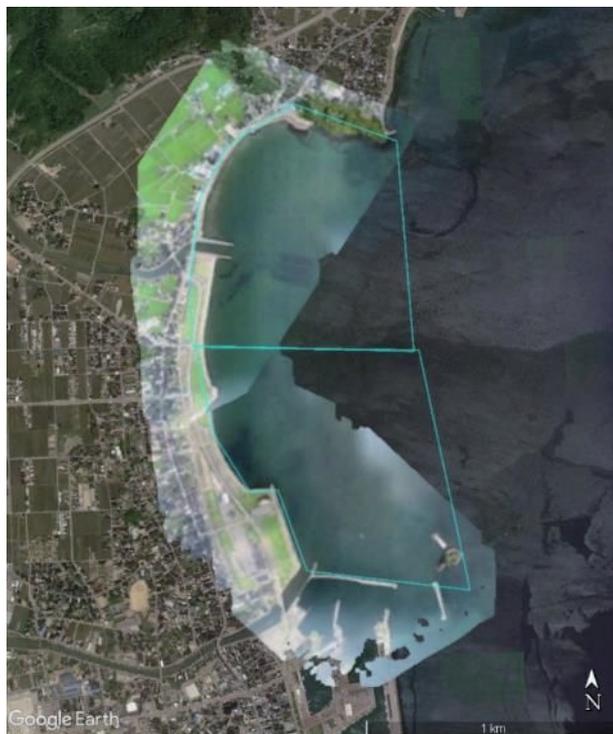
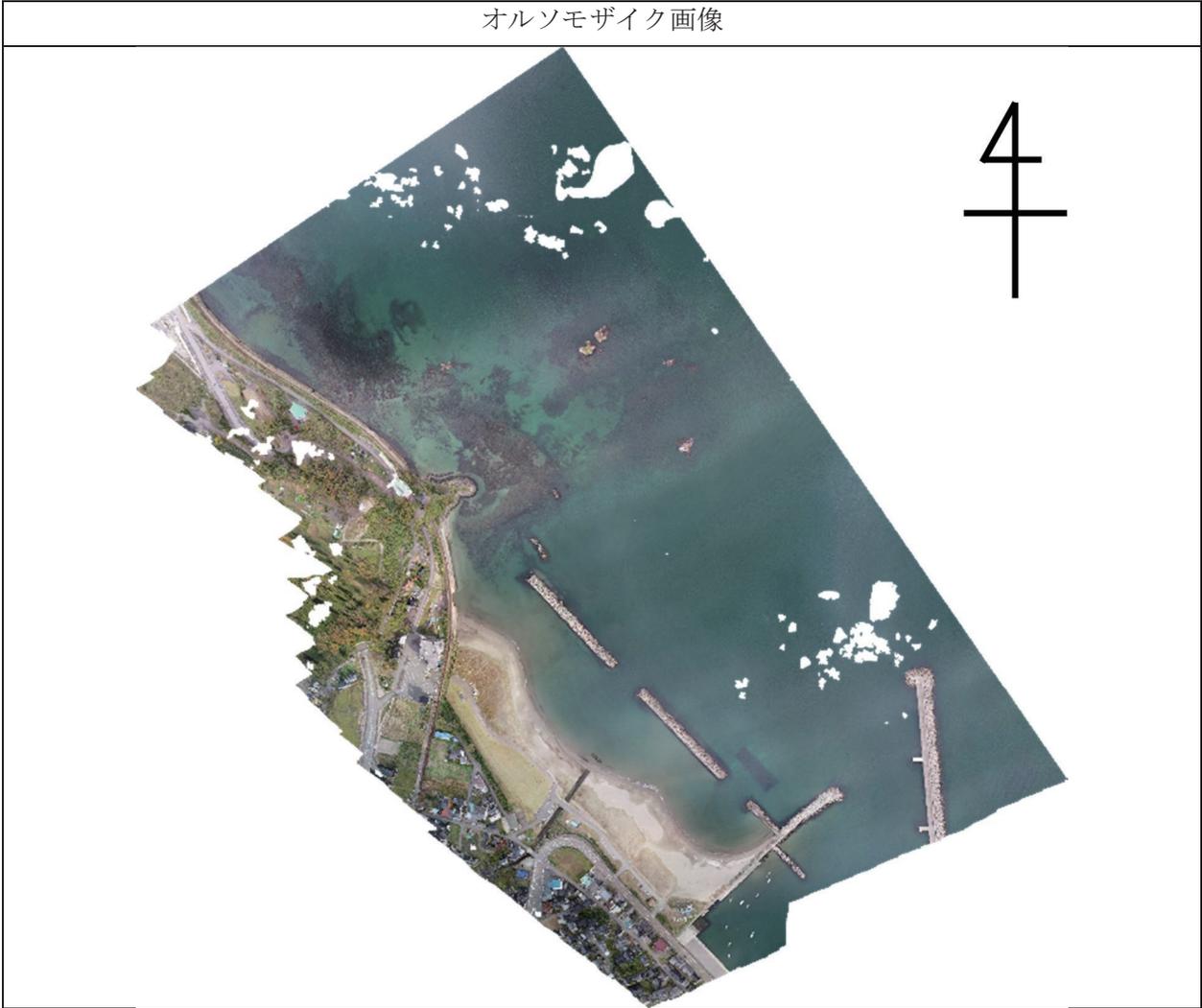


図 4-7 Google Earth 上に表示した比美乃江公園(夏季)のオルソモザイク画像
水色の枠は、自動撮影アプリで設定した撮影範囲

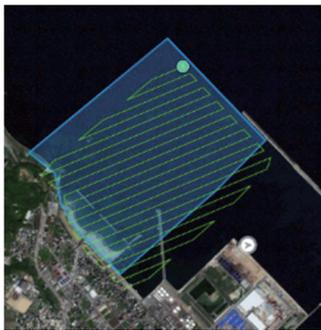
(5) オルソモザイク画像合成結果 (秋季)

【2021年11月18日】 国分浜 (北側) 8:33~9:10 (バッテリー交換回数…1回)

オルソモザイク画像



撮影条件



太陽高度 : 19° (8 : 30)

太陽方位 : 133° (8 : 30)

コースアングル : 203°

太陽方位 : 北を 0° (時計回りに正の値)

コースアングル : 東を 0°

(反時計回りに正の値)

結果・検討事項

左側の浅場の岩礁域とその沖の岩礁域が鮮明に撮影されている。右下にある離岸堤の間にある潜堤が夏季よりはっきりと映っている。岩礁域は明瞭に写っているが、岩礁上の藻場の有無に関しては、本画像からだけでは判断がつかない。

夏季と同様に、画像の下から伸びる防波堤よりも沖側も撮影範囲であったが、大きく合成に失敗している。

【2021年11月18日】 国分浜（南側）9:53～10:03（バッテリー交換回数…0回）

オルソモザイク画像



撮影条件



太陽高度：30°（10：00）
太陽方位：154°（10：00）
コースアングル：210°
太陽方位：北を0°（時計回りに正の値）
コースアングル：東を0°
（反時計回りに正の値）

結果・検討事項

画像合成はほぼ成功しているが、埠頭と北防波堤の間は不鮮明で、海底の藻場が特定できる画像ではない。特徴点が少ない場所であることに加え、撮影時に船の往来が多く、引き波が残った影響があると考えられる。



図 4-8 Google Earth 上に表示した国分浜(秋季)の合成画像
水色の枠は、自動撮影アプリで設定した撮影範囲

4-4 考察

(1) オーバーラップ率・サイドラップ率

オーバーラップ率を 80%、サイドラップ率を 60%に設定した結果、特徴点が多い沿岸部においては画像合成の成功率が高く、設定は適当であったと考えられた。沖合では画像合成に失敗したことから、今後の画像合成の課題は、特徴点の数が少ない場所で画像合成の成功させる条件と、特徴点の多い場所でより効率的に撮影を行うことと考えられた。前者については、海面反射のない状態で特徴点がないということはつまり、海底が写らないということで、ドローン空撮で海底の藻場をモニタリングするという本来の目的を考慮すると、撮影、合成の必要がない海域であるため、画像合成ができなくても問題はない。調査海域の衛星画像を事前に確認し、大まかに空撮で海底が確認できる範囲を絞りこむことで、効率的に調査計画を作成できる。

後者の効率的な撮影とは、撮影時間の短縮の検討である。2019年度はオーバーラップ率を70%、サイドラップ率を50%で撮影し、良好な空撮画像が得られたため、条件を再検討したい。例えば、夏季の国分浜北側105haを撮影するのに要する時間は28分30秒から23分16秒となり、調査時間を8割に減らすことができる。

(2) 偏光の除去

これまでの撮影条件の検討の結果、今年度の撮影では、太陽高度に合わせた撮影時間、太陽方位に合わせた太陽に背を向けて撮影するコースアングル、カメラ角度-45°の条件設定で撮影を実施し、設定の不具合によるサンダークは発生しなかったため、概ね今年の設定で問題は

ないと考えられる。しかし、特徴点の少ない沖側の画像合成を成功させるため、特徴点を含むようにカメラ角度を小さくして撮影するなどの対策を考える場合にはサングリントに注意しなければならない。また、風波や船の引き波といった外的要因による海面の反射が映りこんでしまったため、撮影日の気象や地域の船舶航行状況について情報収集に努めるべきである。

(3) 通信障害

今年度の撮影でも、通信障害が発生することがあり、機体がプロポと未接続になることがあった。原因として、電波障害が起きた可能性、ドローンとプロポの距離が離れて電波が弱まった可能性、プロポとタブレットの接続ケーブルの不具合が考えられた。原因の明らかな電波障害の事例として、操縦者近くの金属製看板が原因であったことがあった。昨年度から遠距離の撮影を回避するため、空撮範囲を区分して撮影を行っているが、直線距離約 800m の場所でも通信障害が発生した。1 km 未満で通信障害が起こったため、電波障害の可能性を考慮し、飛行計画を変更して撮影範囲を狭めた。また、接続ケーブルの接触不良による接続解除が飛行中に発生し、急遽コードを取り換えて対処した。このような予期せぬ現場トラブルは必ず発生するため、日頃からドローンの操縦に慣れ、不測の事態に対応できるように経験を積んでおくことが重要である。

(4) 撮影条件とカメラ設定

カメラのオート設定により、色合いが自動で変化し、その影響が無視できないことが分かった。陸域が撮影範囲に入る場合は、陸域の白が強いためシャッタースピードが早くなる影響で海域は青みが強くなり、陸域が撮影範囲に入らない沖ではシャッタースピードが遅くなる影響で海域は黄、緑色が強く写る。このようなカメラのオート設定を反映して、オルソモザイク画像を作成した場合に沿岸の海色は青く、沖合の海色は黄色が強くて、あたかも海色が岸沖方向に変化していたかのように合成される。カメラの自動設定に注意し、現場で試し撮りを行い、適した条件に固定して撮影した結果と比較する必要がある。

(5) オルソモザイク画像

ドローンの空撮画像を基に、国分海浜公園周辺約 172ha（夏季）、比美乃江公園周辺約 115ha、国分海浜公園周辺 130ha（秋季）のオルソモザイク画像の合成に成功した。Google Earth の衛星画像と重ね合わせ、道路や防波堤の位置を比較し、おおむね良好な位置精度が得られていた。目的とした撮影範囲の海面に対して画像合成できた面積比率は、それぞれ 74%、61%、53%であり、沿岸域は合成出来ているものの、沖合域で合成できなかった。沖合域では特徴点が少ないために画像合成に失敗すると考えられる。沖合域であっても、伏木万葉埠頭北防波堤のように特徴点として利用できる構造物があればうまく合成されている。合成率が低く、海底の確認に使えない沖合域の撮影は藻場モニタリングには不要であるため、沿岸に沿った浅場を幅広く撮影した方がよいと考えられた。

今回は、2 つに区分した空撮範囲でそれぞれに画像合成を行ったが、特定海域を空撮でモニタリングするという目的からすると、複数の区画に分けて撮影した空撮画像をまとめて 1 つのオルソモザイク画像に合成する方が目的に沿う。1 海域に対して複数のオルソモザイク画像が

存在すると、国分海浜公園沖の夏季のように、オルソモザイク画像同士が重なる部分がでてくるため、重なる部分のオリジナル空撮画像を確認し鮮明な画像を選んで合成に用いた方がよい。

今年度は、2018年度の調査以降、3年ぶりに比美乃江公園沖のドローン空撮を実施した。水中ビデオカメラ調査結果から比美乃江公園の北部にアマモが存在することが確認されたが、オルソモザイク画像を一見したところ、アマモ場は見えにくく、岩礁性藻場が目立つ。合成前の空撮画像を個別に確認すると、若干色の違う場所が写っており、アマモ場と考えられる。この場所におけるアマモ場は見えづらく、合成画像だけでは見逃す可能性がある。また、岩礁性藻場と思われる濃色領域について、岩礁なのか、藻が繁茂しているのかを画像だけでは判別できない。合成画像を正しく解釈するため、現場確認を行い、海藻の構成種等の詳細な情報を合わせて整備しておく必要がある。

(6) 撮影可能海域の地理的条件

水中ビデオカメラによる藻場調査で、埠頭西側先端部の水深8m（定点8.6）にアマモ場が毎年夏季に存在することがわかっており、ドローンによる空撮を試みているものの、過去3年で1度も撮影できておらず、また船舶の上から目視確認できない。一方で、国分海浜公園の北側に位置する男岩周辺を見ると、沖側の定点33は水深6mであり、周辺の水深6～8m程度の場所でドローンの画像から岩礁性藻場が確認できるため、海水の透明度が高ければ、埠頭西側先端部のアマモ場も空撮で確認できるはずである。しかし、実際には、小矢部川からの透明度の低い河川水が埠頭と北防波堤の間を氷見方面に流れ、周年透明度が低くなっていると考えられる。衛星画像を用いた藻場分布解析では衛星のマルチスペクトル画像に対して教師データを与えることでこの海域の小規模の藻場分布を抽出できる可能性があるが、ドローンの可視光カメラで透明度の低いこの海域のアマモ場を捉えることは難しいことがわかった。

広域藻場モニタリングの手引き（水産庁、2021）では、ドローン空撮の対象となる藻場は、水面から海草が見える主に水深が10m以下の海域とされ、水深10mより浅い場所でも海の濁りが強く透明度が水深を下回る場合には藻場が見えないことがあると述べられている。国分海浜公園周辺では、男岩周辺の水深8mの場所で、冬場には岩礁性藻場が確認されるため、海水自体の透明度は十分高くなる時期があるが、埠頭西側先端部は河川水の影響が強く、海底が見えない地理的条件にある。このように、水深10m以浅の場所に存在する藻場であっても、地理的条件によりドローン調査に不向きな場所が存在することがわかった。

藻場分布域のマッピングは、水中ビデオカメラ調査や潜水調査の「点」の情報だけでは困難であり、空撮画像から藻場と思われる領域を抽出し、水中ビデオカメラ調査結果と合わせて、藻場分布の把握が可能となる。ドローンによる空撮は、浅く、透明度が高い場所において、人工衛星や航空機による空撮画像を時空間的に補完する有用な調査ツールとなる可能性があり、藻場等の沿岸域モニタリングへのドローンの活用方法を更に検討したい。

4-5 今後の課題および改善策

今後、空撮画像の精度及びオルソモザイク画像合成の成功率を向上させるための対応としては、以下の撮影条件①～④に加え、水深や平均的な透明度からドローンで撮影に適した海域であるかを検討する必要がある。

① カメラ角度を 45° 以上にする

45° で撮影した時に海中の様子が鮮明に確認できない場所があり、水中での光の通過距離が短い方が藻場空撮に適していると考えられるため、より真上からの撮影を検討する。ただし、海上での特徴点が少ないと、画像合成に失敗する可能性が高まるため注意が必要である。

② 太陽方位に合わせてコースアングルを設定する

サングリントをなるべく回避するため、太陽方位に合わせてコースアングルを設定する。ただし、①と同様に海上での特徴点が少ないと、画像合成ができない可能性がある。

③ 太陽高度を考慮する

サングリントの回避と光量確保のため、太陽方位が 30° 以上 45° 以下の時間帯で撮影をする。冬季はなるべく太陽高度が高い時間に撮影する。夏季は雲の映り込みを防ぐため太陽高度が高くない時間に撮影する。

④ 進行方向に対して垂直に撮影

昨年度までは、カメラ方向を空撮コースに並行（前向き）とし、海面に対する角度の調整や偏光レンズの種類の調整を試してきたが、画像合成の結果は、地形に歪みが生じたり、合成の成功率は高くなかった。この原因として、被写体となる海面に対してコース（進行方向）と並行に撮影した場合、カメラが被写体に近づいたり遠ざかったりすることで特徴点の対象となるポイントの大きさが異なって写り、特徴点として認識されないことが考えられた。そこで今年度は、カメラ方向を空撮コースに垂直（右向き）として撮影することを検討したところ、画像合成の成功率が高まったことから、カメラ方向は進行方向に対して垂直右向きとする。

5. 波浪ブイを用いた富山湾西部藻場周辺の波浪観測

5-1 目的

富山湾において、アマモ場は県西部の氷見市沿岸に県全体の 90%以上が存在している。これまでの NPEC の調査で高岡市伏木地先においてもわずかに存在し、伏木富山港北防波堤内側の特定の場所にアマモが定着しており、その場所は波浪の影響が小さいことにより生育条件が整っていると推測された。波浪はアマモ場の形成に大きく影響すると考えられるが、県西部の主要なアマモ場周辺において波浪観測は行われていないため、アマモ生息域の波浪特性は明らかとなっていない。アマモが定着する場所の波浪環境を明らかにするため、波浪ブイによる観測を実施した。

5-2 方法

富山湾西部海域のアマモ場周辺において波浪環境を把握するため、氷見漁業協同組合宇波支所に所属する宇波浦漁業組合の定置漁業権内に波浪ブイを設置した。

設置した波浪ブイは GPS 波高計内蔵型ブイ (SOFAR 社製、Spotter) で、海面に漂いながら 30 分間隔で時刻、緯度、経度、有義波高、波浪周期、波向き、海面水温等を記録した。ブイ本体は空中重量 5.4 kg、直径 42 cm の球状であった。波浪ブイは国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所港湾空港技術研究所(以下、港湾空港技術研究所)が調達し、宇波浦漁業組合が設置、日々の点検を行った。

設置期間は 2021 年 12 月 10 日～2022 年 3 月 24 日であった。

設置場所は 36° 54.963'N, 137° 2.105'E で、定置免許第 77 号「馬場」の免許内、定置網の北側台浮子の岸側、水深 34m の場所に設置した(図 5-3)。この場所は、小境海水浴場の沖 700m に位置している。この観測場所を「宇波」と呼ぶこととする。

宇波の波浪観測結果を近辺の観測情報と比較するため、国土交通省港湾局全国港湾海洋波浪情報網「ナウファス」の伏木富山港伏木(以下、伏木)、伏木富山港富山(以下、富山)における有義波高、平均周期の時間変化を調べた。

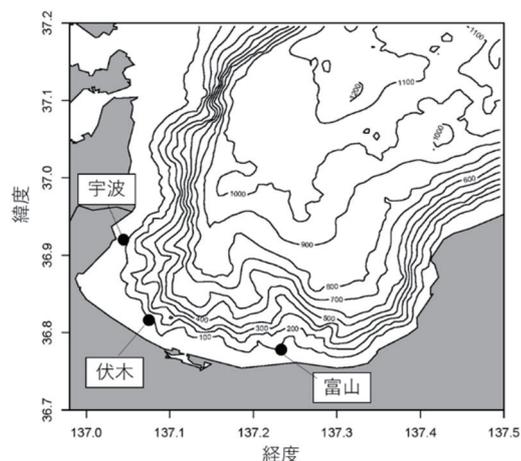


図 5-1 宇波、伏木、富山の波浪観測点の位置図

ブイの係留方法は、現場水深 34m に合わせて、直径 18 mm のロープ 22~23 ヒロ (33~34.5m) と 6 寸の浮き玉 2 つを 50 kg のサンドバックを 4 つ用いて固定し、その浮き球から 3 ヒロ (4.5

m) 分 18 mmのロープを伸ばし、より戻しは使用しなかった。ブイが波の上下動を出来る限り正しく捉えられるように、ブイがある程度、自由に動くことのできる係留方法を採用した。



図 5-2 観測ブイと浮き球

観測値やブイの位置は、SOFAR 社のウェブサイト上で確認することができ、宇波浦漁業組合の漁業者、港湾空港技術研究所、NPEC がリアルタイムでモニタリングを行った。また、3 月 25 日にブイを回収し記録された詳細なデータを解析に用いた。

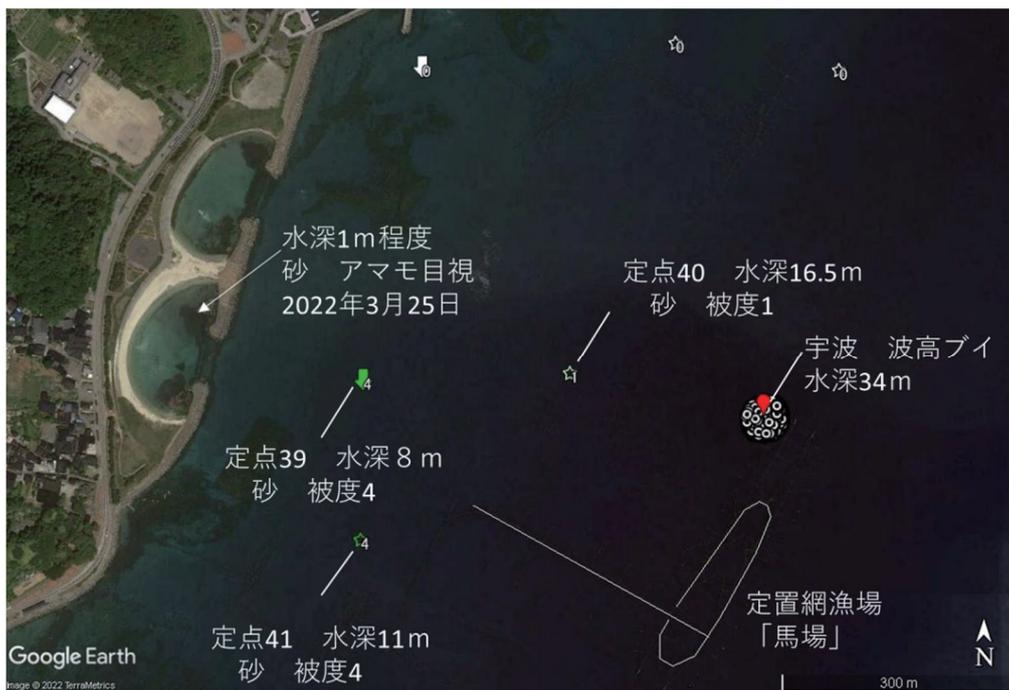


図 5-3 波浪ブイ設置個所と2021年7月12日の水中ビデオカメラ調査結果

2021年7月12日に富山県農林水産総合技術センター水産研究所との合同調査で、アマモ繁茂状況を水中ビデオカメラで確認した(図 5-3)。波浪ブイから小境海水浴場の岸方向に向かって、水深 16.5mの地点 40 はアマモ被度 1、水深 8mの地点 39 はアマモ被度 4、地点 39 から南に 200mに位置する地点 41 は水深 11mでアマモ被度 4 であり、観測地点付近でアマモの生育が確認された (図 5-3)。

なお、ブイ回収時の3月25日に、小境海水浴場内にアマモが繁茂していることを目視確認した。

5-3 結果と考察

期間中に測定機器や係留系のトラブルがなく、全期間においてデータを取得することができた。より戻しを使わない簡易な係留系であったが、ロープがからまったり、漂流物がからみつくことはなかった。図5-3のブイ周りの点はブイが動いた軌跡を表し、ブイは半径25m程度の円の中を動いた。ロープの長さから想定される最大移動範囲は半径16~19mの円であったが、ロープの長さを正確に測らずに係留系を作成したために、想定よりも広く動いたと考えられる。しかし、定置網に干渉することはなかった。

ブイは太陽光発電で稼働するため、冬期の日本海では日照が少なく発電不足が心配されたが、問題なく稼働し続けた。データを分析したところ、係留による影響で波高が低く観測されている可能性があり、より正しく波を観測するためには、浮き球からブイまでの係留資材を見直す必要がある。

宇波において、2021年12月10日13時から2022年3月24日10時まで104日間にわたりブイを係留し、4,924個の波のデータを記録した。

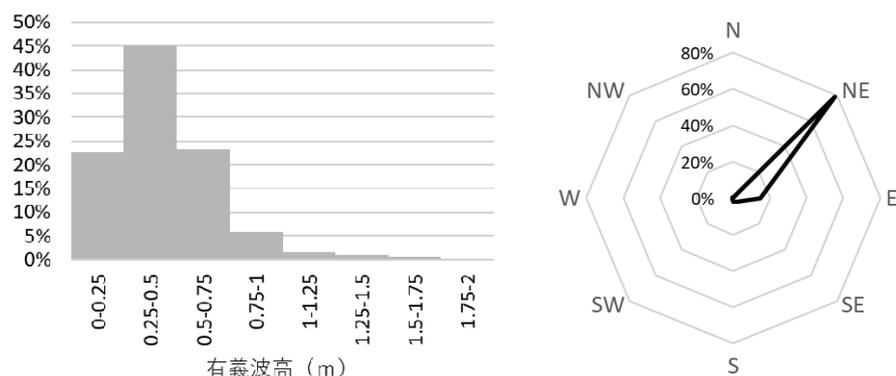


図5-4 有義波高の頻度分布と、波向きの頻度分布

図5-4は、有義波高の頻度分布を表すヒストグラムで、1.5mを超える波は全体の0.7%であった。波向きは北東が卓越し、北東および東方向からの波で全体の93%を占めた。富山湾の地形は北から北東方向に開けており、湾内、湾外から伝播する北東の波が多くなったと考えられる。

計測した全期間の有義波高、平均周期、水温の推移を図5-5に示した。

まず、有義波高の平均値は0.44m±0.25mで、観測期間中の最大有義波高は12月25日正午に観測された1.87mであった。有義波高が1.5mを超えた日は3日あり、2021年12月25日、2022年2月14日、3月18日であった。それぞれ有義波高1.5mを超えた波の継続時間が、9時間、2時間、7時間であった。

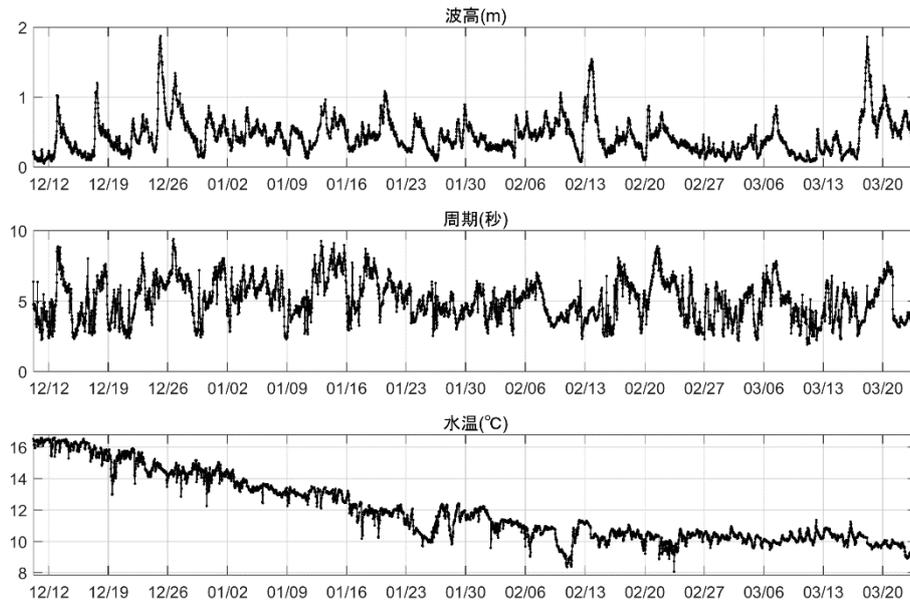


図 5-5 波浪ブイによって記録された有義波高、平均周期、水温

平均周期は平均値が 5.01 秒±1.43 秒、最大値は 12 月 27 日の 9.4 秒であった。観測期間中、周期 10 秒を超える典型的な寄り回り波は観測されなかった。

1 日の平均表層水温は、12 月は 16°C 台で、以降徐々に低下し、3 月末に 9°C 台まで低下した。これは対馬暖流の季節変化を反映していると考えられる。1 日の平均変動幅は 1.1°C で、1 日の中でも変動が大きく、12 月から 3 月にかけて 1 日の変動幅が小さくなる傾向が見られた。一時的に 8°C 台まで下がり、最低水温は 8.06°C (2 月 23 日 20 時) であった。富山湾において対馬暖流水が 9°C を下回ることはないこと、大きな水温の日変動が観測されたことから、観測地点の表層部に低温の河川水が断続的に影響していることを示している。

最大波高が観測された 12 月 25 日と、最大平均周期が観測された 12 月 27 日の天気図を図 5-6 に示した。両日ともに低気圧が北海道北東部のオホーツク海上に存在し、日本海北部に沿って等圧線の間隔が狭まり、北寄りの風が強く吹いたことがわかった。能登半島外側の石川県輪島における 12 月 25 日、27 日の平均風速と風向は、7.9m/s、北および 4.5m/s、北西であった。日本海北部で発生したうねりが南に伝播し、能登半島周辺の北寄りの風と合わさって、観測地点で波高が高くなったと考えられ、12 月 25 日は風波、27 日はうねりの性質を強く示している (図 5-7)。

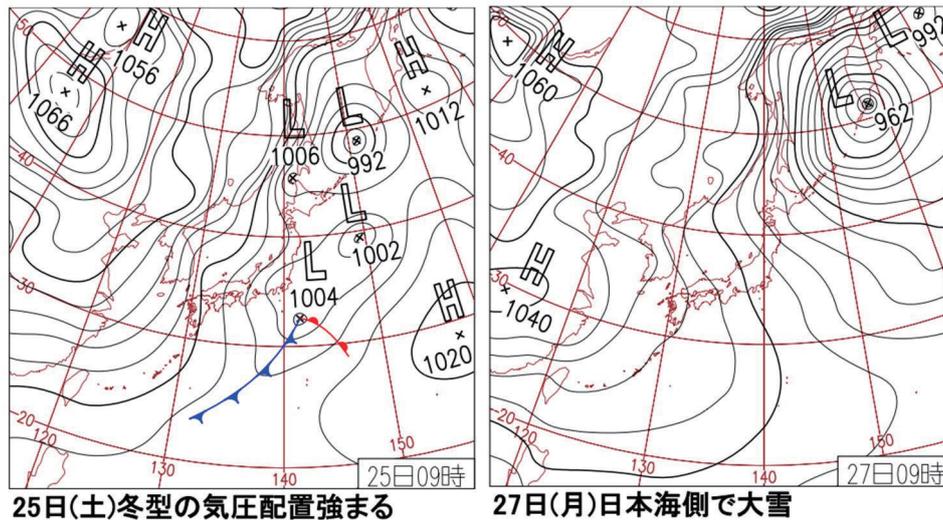


図 5-6 2021 年 12 月 25 日、27 日の天気図
気象庁「日々の天気図(拡大版)」より抜粋

宇波の波浪観測結果を近辺の観測情報と比較するため、全国港湾海洋波浪情報網「ナウファス」の伏木富山港伏木（以下、伏木）、伏木富山港富山（以下、富山）における有義波高と平均周期の推移を調べた。ちなみに、これらの観測点の沿岸で、波浪を遮る構造物がない場所ではアマモは定着していない。

2021 年 12 月分を比較した結果、伏木は宇波と有義波高の変動パターンは似ているがやや波高が高く、富山は宇波よりも波高が高いことが多く、平均波高は宇波 0.45m、伏木 0.56m、富山 0.79mであった（図 5-7）。伏木と宇波、富山と宇波の波高の相関関係から、宇波の波高は伏木の 78%、富山の 49%に低下すると求められた。

また、波高の大きさが異なるだけでなく、最大波高を記録した時刻が異なっていた。宇波では 12 月 25 日の正午に最高波高 1.87m となったが、伏木、富山では、12 月 27 日未明に最高波高となり、それぞれ 2.34m、3.96m であった。そのときの宇波は波高が 1.34m 以下であった。平均周期は、12 月 25 日の正午前後は 3 か所とも 5~7 秒であるのに対し、12 月 27 日未明は 9~12 秒でうねりの強い寄り回り波の特徴を示した。12 月 23 日も富山の平均周期は 8 秒を超え、富山の波高は 2.38m に達したが、宇波は 0.75m と穏やかであった。

これらの事例を基に、宇波と伏木、富山の波を考察すると、3 か所の波は概ね連動して変化しているが、宇波は風波の影響は受けやすいが、常に波高が他 2 か所に比べて低く、周期 10 秒前後のうねり（寄り回り波）に対して、伏木、富山と比べて波高が高くないことがわかった。風波は波長が短く、海底面での流体の運動は小さいが、うねりは波長が長く、海底面で流体は楕円運動し、海底面への影響が大きいため、うねりの波高が低くなる富山湾西部のみにアマモ場が偏在すると推測される。

寺内・前田（2016）は、人工衛星画像を用いた藻場解析により、氷見市沿岸では島尾海岸から阿尾にかけて水深 3~11m の幅広い範囲にアマモが帯状にまとまって分布すると述べた。また、氷見市沿岸の 3m 以浅の海域でほとんどアマモが確認できなかった理由として、冬季から春先にかけての強い波浪（周期 10~12 秒、波高 3~5m）の影響が大きいと示唆した。今回の観測により、アマモ分布と比較するための現場波浪データを得ることができた意義は大きい。

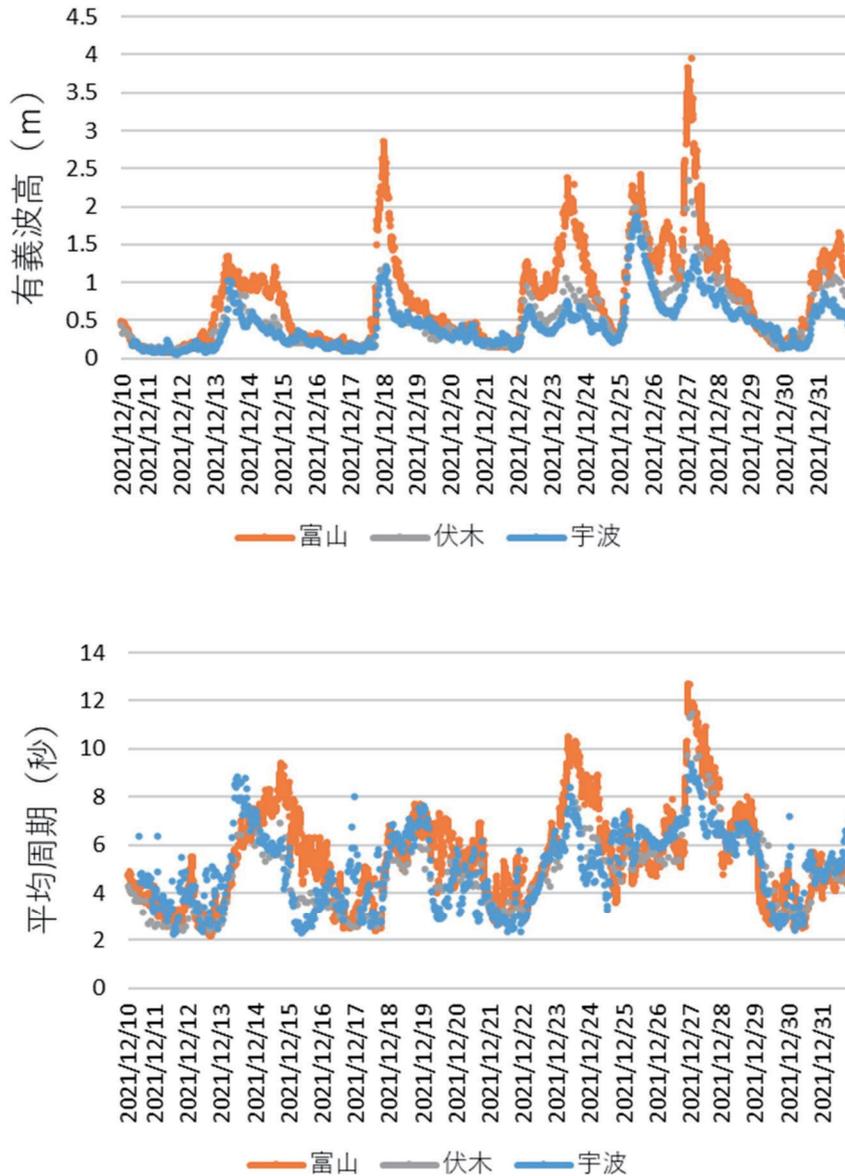


図 5-7 宇波、伏木、富山における 2021 年 12 月の有義波高と平均周期

今後の課題として、得られた波浪データをより詳細に解析し、各地先の海底部の環境を定量的に比較したいと考えている。また、冬季の波浪が弱い年には底質の攪乱が起こりにくく、春に広い面積のアマモ場が形成される可能性が考えられた。広域的には、過去の衛星画像を解析し、冬季の波浪環境の強弱と、アマモ場の面積に関係があるかを広範囲で調べる方法が考えられる。他にも、波浪環境が厳しい伏木富山港北防波堤内側のアマモ群落のような、小さく独立したアマモ場を調査対象として、水中確認によってアマモ場の面積を毎年モニタリングすることができれば、波浪環境と比較することもできるかもしれない。比美乃江公園北側のような波の影響を受けやすい浅場（水深 3 m 程度）では、ドローンで高頻度の観測が可能であり、大きな波浪イベントの前後でアマモ場面積の変化を調査することも有効であると考えられる。様々なモニタリング手法を駆使し、アマモ場の形成条件の閾値となる環境条件を調べ、移植適地の選定に利用し、効率的なアマモ増殖活動に繋げていくことが望ましいと考えている。

6. 富山湾の海藻・海草に関する文献

6-1 論文—藻場—

- 菊池勘左衛門 (1934) 富山湾海藻目録. 富山教育, **255**, 1-24.
- 藤田大介・泉治夫 (1989) 富山県沿岸産海藻目録, 富山県水産試験場研究報告, **1**, 33-49.
- 藤田大介・岡田英男・坂田完三 (1990) サザエ稚貝の天然餌料としての漁港防波堤側面に生息する紅藻数種の重要性(英文), 富山県水産試験場研究報告, **2**, 41-51.
- 藤田大介・湯口能生夫 (1995) 富山県朝日町宮崎沿岸の海藻, 富山県水産試験場研究報告, **6**, 1-15.
- 藤田大介 (1996) 富山湾の無節サンゴモとその群落, 日本海ブロック試験研究集録, **33**, 63-70.
- 藤田大介 (1996) 黒部生地沿岸の海藻, サザエ及びキタムラサキウニ, 富山県水産試験場研究報告, **8**, 11-20.
- 藤田大介 (1996) エゾイシゴロモの培養藻体に生じた異常突起物(英文), 富山県水産試験場研究報告, **8**, 21-24.
- 藤田大介・岡本勇次・真山茂樹 (1996) 魚津市沿岸礫地帯の堆積砂で見つかった珪藻の1種(短報), 富山県水産試験場研究報告, **8**, 25-29.
- 新井章吾・藤田大介・寺脇利信 (1997) 富山県虻が島で見つかったヒジキの生育状況(短報), 富山県水産試験場研究報告, **9**, 49-52.
- 藤田大介 (1997) 富山湾東部沿岸域で認められている藻場の衰退現象, 藻類, **45**, 75.
- 藤田大介・高山茂樹 (1999) 富山県魚津市地先における海草ウミヒルモとコアマモの生育記録(短報), 富山県水産試験場研究報告, **11**, 67-70.
- 寺脇利信・新井章吾 (1999) 藻場の景観模式図 1, 富山県氷見市宇波地先, 藻類, **47**, 147-149.
- 藤田大介 (2001) 富山県沿岸産海藻目録(2001年改訂版), 富山県水産試験場研究報告, **13**, 1-18.
- 藤田大介 (2001) 海洋深層水をかけ流した磯焼け地帯転石の植生回復, 海洋深層水研究, **2**, 57-64.
- 池森貴彦・大慶則之・田島迪生 (2002) 能登半島東岸におけるホンダワラ類の現存量, 栽培技研, **29**, 101-106.
- 藤田大介・新井章吾・村瀬昇・田中次郎・渡辺孝夫・小善圭一・松村航・長谷川和清・千村貴子・佐々木美貴・松井香里 (2003) 氷見市虻が島周辺のガラモ場の垂直分布, 生産構造および葉上動物相, 富山県水産試験場研究報告, **14**, 43-60.
- 藤田大介・新井章吾・村瀬昇・長谷川和清・田中次郎 (2004) 富山湾西部虻が島のガラモ場における海藻の垂直分布と帯状構造, 藻類, **52**, 149-156.
- 藤田大介 (2004) 海底湧水によって維持される藻場, 月刊海洋, **36**, 810-815.
- Fujita, D., T. Ishikawa, S. Kodama, Y. Kato and M. Notoya (2006) Distribution and recent reduction of *Gelidium* beds in Toyama Bay, Japan. Journal of Applied Phycology, **18**, 591-598.
- 寺内元基・前田経雄(2016) 北西太平洋地域における衛星リモートセンシングによる富栄養化の評価と藻場マッピングの現状と課題, 沿岸海洋研究, **54**, 29-42.
- 寺脇利信・新井章吾 (2006) 藻場の景観模式図 22, 富山県氷見市小境海岸施設の消波ブロック, 藻類, **54**, 173-175.
- 寺脇利信・新井章吾 (2008) 富山湾西部・虻が島地先, 藻類, **56**, 206-208.
- 砂澤洋平・鈴木秀和・能登谷正浩・藤田大介 (2009) 富山県氷見市沿岸のテングサ場における付着珪藻 *Arachnoidiscus ornatus* Ehrenb の発生状況, Diatom, **25**, 79-85.

Tsujimoto, R, (2011) Fisher activities to conserve the ecosystem of Toyama Bay, Biological and cultural diversity in coastal communities, Exploring the potential of *Satoumi* for implementing the ecosystem approach in the Japanese Archipelago, Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Montreal, Technical Series no, **61**, 30-37.

池森貴彦・東出幸真・坂井恵一 (2012) 能登半島珠洲市沿岸におけるガラモ場とアマモ場の分布域の再検討, 能登海洋ふれあいセンター研究報告, **18**, 1-6.

東出幸真・小木曾正造・池森貴彦 (2014) 能登半島七尾湾西湾におけるアマモ類の生育状況について, 能登海洋ふれあいセンター研究報告, **20**, 17-23.

坂井恵一・東出幸真・小木曾正造 (2015) 能登半島 5 の七尾湾西湾に生育するアマモ *Zostera marina* の特徴, 能登海洋ふれあいセンター研究報告, **21**, 1-9.

池森貴彦・東出幸真・坂井恵一 (2016) 石川県の七尾西湾におけるアマモ類の分布域と季節的特徴, 日本海域研究, **47**, 29-33.

坂井恵一 (2017) 特異的な季節消長を示す能登半島七尾西湾のアマモ場, のと海洋ふれあいセンターだより, **46**, 2-5.

6-2 論文－海藻培養－

松村航・藤田大介 (2002) 海洋深層水培養コンブの介生生長に基づく自給型アワビ養殖の提案, 海洋深層水研究, **3**, 53-63.

松村航・渡辺健・南條暢聡・浦邊清治・林正敏・池田知司・藤田大介 (2005) 海洋深層水を用いたマクサの培養と富山湾深層水放水域での成長予測, 海洋深層水研究, **6**, 1-8.

松村航・藤田大介 (2007) 海洋深層水で培養したマコンブと付着珪藻を餌料として活用したエゾアワビ養殖に関する研究(短報), 富山県水産試験場研究報告, **18**, 19-23.

6-3 報告書

富山県 (1978) 第2回自然環境保全基礎調査 干潟・藻場・サンゴ礁分布調査報告書, 環境省委託.

環境庁自然保護局・財団法人海中公園センター (1994) 第4回自然環境保全基礎調査報告書.

環境庁自然保護局 (1998) 第5回自然環境保全基礎調査 海辺調査総合報告書.

環境省自然環境局 生物多様性センター (2008) 第7回自然環境保全基礎調査, 浅海域生態系調査 (藻場調査) 報告書.

富山県水産試験場 (1999) 富山県東部 (黒部市・入善町・朝日町) 沿岸域の漁場環境, 漁業振興特別対策事業報告書. pp. 94.

藤田大介 (2001) 氷見市・高岡市沿岸の海藻と藻場. 氷見漁業協同組合. pp.60.

新潟県水産海洋研究所・富山県水産試験場・福井県栽培漁業センター・神奈川県水産総合研究所・和歌山県農林水産総合技術センター水産増殖研究所 (2001) 資源増大技術開発事業 (浅海域グループ) 報告書.

新潟県水産海洋研究所・富山県水産試験場・福井県栽培漁業センター・神奈川県水産総合研究所・和歌山県農林水産総合技術センター水産増殖研究所 (2002) 資源増大技術開発事業 (浅海域グループ) 報告書.

富山県水産試験場 (2002) 富山湾の漁場環境(2001)－水質・底質・藻場－. 富山湾漁場環境総合調査

報告書, pp.174.

富山県水産試験場 (2007) 富山湾の漁場環境(2006)ー水質・底質・藻場・餌料環境ー, 平成 18 年度富山湾漁場環境総合調査報告書, pp.204.

日本の里山・里海評価ー北信越クラスター (2010) 里山・里海: 日本の社会生態学的生産ランドスケープー北信越の経験と教訓ー, 国際連合大学, 東京, pp.109.

富山県水産研究所 (2013) 富山湾の漁場環境(2011)ー水質・底質・藻場ー, 平成 23 年度富山湾漁場環境総合調査報告書, pp.178.

富山県水産試験場 (2018) 富山湾の漁場環境(2016)ー水質・底質・藻場・餌料環境ー, 平成 28 年度富山湾漁場環境総合調査報告書, pp.203.

6-4 本

大島勝太郎 (1950) 『富山湾海藻誌』, 東京.

富山県水産試験場 (1994) 『富山の藻類』, 藤田大介・濱田仁・渡辺信編.

富山県水産試験場 (2005) 「藻場」, p.108-115. 『富山湾を科学する』, 北日本新聞社, 富山.

矢野恒信 (2006) 「昆布に想う」, p.236-240, 『日本海学の世紀 6. 海の力』 (蒲生俊敬・竹内章編), 角川学芸出版, 東京.

藤田大介 (2010) 「変わりゆく富山湾の藻場」, p. 142-147, 『藻場を見守り育てる知恵と技術』 (藤田大介・村瀬昇・桑原久実編), 成山堂書店, 東京.

6-5 本報告書内で参考にした文献

ESRI ジャパン株式会社 (2011) 実線! ENVI 講座 ArcGIS ユーザのためのリモートセンシング画像処理入門, 142pp.

池森貴彦・東出幸真・坂井恵一 (2012) 能登半島珠洲市沿岸におけるガラモ場とアマモ場の分布域の再検討, 能登海洋ふれあいセンター研究報告, 18, 1-6.

藤田大介 (2001) 氷見市・高岡市沿岸の海藻と藻場, 氷見漁業協同組合, 氷見市, pp.65

藤田大介 (2010) 藻場の種類, p. 1 磯焼け対策シリーズ 3 藻場を見守り育てる知恵と技術(藤田大介・村瀬昇・桑原久美編著) 成山堂書店, 東京.

藤田大介・新井章吾・村瀬昇・長谷川和清・田中次郎 (2004) 富山湾西部虹が島のガラモ場における海藻の垂直分布と帯状構造, 藻類, **52**, 149-156.

Fujita, D., T. Ishikawa, S. Kodama, Y. Kato, M. Notoya (2006) Distribution and recent reduction of *Gelidium* beds in Toyama Bay, Japan. *Journal of Applied Phycology*, **18**, 591-598.

東出幸真・小木曾正造・池森貴彦 (2014) 能登半島七尾湾西湾におけるアマモ類の生育状況について. 能登海洋ふれあいセンター研究報告, 20, 17-23

環境庁自然保護局・財団法人海中公園センター (1994) 第 4 回自然環境保全基礎調査報告書.

環境庁自然保護局 (1998) 第 5 回自然環境保全基礎調査 海辺調査総合報告書.

公益財団法人環日本海環境協力センター (2013) 平成 24 年度富山湾リモートセンシング調査事業報告書. pp. 112.

公益財団法人環日本海環境協力センター (2015) 平成 26 年度富山湾リモートセンシング調査事業報告書. pp. 116.

- 公益財団法人環日本海環境協力センター (2016) 平成 27 年度富山湾リモートセンシング調査事業報告書. pp. 100.
- 公益財団法人環日本海環境協力センター (2017) 平成 28 年度富山湾リモートセンシング調査事業報告書. pp. 99.
- 公益財団法人環日本海環境協力センター (2018) 平成 29 年度富山湾リモートセンシング調査事業報告書. pp. 55.
- 公益財団法人環日本海環境協力センター (2019) 平成 30 年度富山湾リモートセンシング調査事業報告書. pp. 74.
- 公益財団法人環日本海環境協力センター (2020) 令和元年度富山湾リモートセンシング調査事業報告書. pp. 64.
- 公益財団法人環日本海環境協力センター (2021) 令和 2 年度富山湾リモートセンシング調査事業報告書. pp. 53.
- 小松輝久・藤田大介・青木優和 (2009) 藻場研究の今—分布・生態から磯焼け対策・利用まで—. 月刊海洋, **41**, 593-597.
- Mumby, P. and A. Edwards (2000) Water column correction techniques. In Remote sensing handbook for tropical coastal management (Ed. E. P. Green, P. J. Mumby, A. J. Edwards and C. D. Clark). Coastal management sourcebooks 3, UNESCO.
- Sagawa, T., E. Boisneier, T. Komatsu, K. B. Mustapha, A. Hattour, N. Kosaka and S. Miyazaki (2010) Using bottom surface reflectance to map coastal areas: a new application method for Lyzenga's model. International Journal of Remote Sensing, **31**, 3051-3064.
- Komatsu, T., Hashim, M., Nurdin, N., Noiraksar, T., Prathep, A., Stankovic, M., Hoang-Son, T. P., Thu, P. M., Luong, C. V., Wouthyzen, S., Phauk, S., Muslim, A. M., Yahya, N. N., Terauchi, G., Sagawa, T., and Ken-ichi Hayashizaki, K.-H. (2000) Practical mapping methods of seagrass beds by satellite remote sensing and ground trothing, Coast. Mar. Sci., **43**, 1-25
- 坂井恵一 (2017) 特異的な季節消長を示す能登半島七尾西湾のアマモ場, のと海洋ふれあいセンターだより, **46**, 2-5.
- 澤山周平・小松輝久 (2011) 衛星画像を用いた石西礁湖の底質環境マッピングからの生態情報の抽出. La mer, **49**, 17-29.
- 水産庁(2021) 広域藻場モニタリングの手引き, pp. 70.
- 寺脇利信・新井章吾 (2006) 藻場の景観模式図 22. 富山県氷見市小境海岸施設の消波ブロック. 藻類, **54**, 173-175.
- 寺脇利信・新井章吾 (2008) 富山湾西部・虻が島地先. 藻類, **56**, 206-208.
- 富山県 (1978) 第 2 回自然環境保全基礎調査 干潟・藻場・サンゴ礁分布調査報告書. 環境省委託.
- 富山県水産漁港課・北陸航測株式会社 (1994) 沿岸漁場総合整備開発基礎調査 富山海域漁業環境マップ.
- 富山県水産試験場 (1999) 富山県東部 (黒部市・入善町・朝日町) 沿岸域の漁場環境, 漁業振興特別対策事業報告書, pp. 94.
- 富山県水産試験場 (2002) 富山湾の漁場環境(2001)—水質・底質・藻場—. 富山湾漁場環境総合調査報告書, pp. 174.

- 富山県水産試験場 (2007) 富山湾の漁場環境(2006)―水質・底質・藻場・餌料環境―，平成 18 年度
富山湾漁場環境総合調査報告書，pp. 204.
- 富山県水産研究所 (2013) 富山湾の漁場環境(2011)―水質・底質・藻場―，平成 23 年度富山湾漁場
環境総合調査報告書，pp. 178.
- 富山県水産研究所 (2018) 富山湾の漁場環境(2016)―水質・底質・藻場―，平成 28 年度富山湾漁場
環境総合調査報告書. pp. 203.
- 海と渚環境美化推進機構 (2003) 平成 14 年度藻場・干潟環境保全調査報告書.
- 浦邊清治・松村 航 (2007) アマモ類の遺伝的多様性の解析調査 平成 18 年度報告書（最終報告
書）. 独立行政法人水産総合研究センター東北区水産研究所（とりまとめ）.

令和3年度富山湾リモートセンシング調査事業報告書
2022年3月31日発行

著者 小塚 晃
寺内 元基
発行 公益財団法人環日本海環境協力センター
〒930-0856 富山県富山市牛島新町 5-5
Tel: 076-445-1571
Fax: 076-445-1581
印刷 とうざわ印刷工芸株式会社
